

# ENERGIA ELECTRICA Y MEDIO AMBIENTE EN MEXICO

LETICIA CAMPOS ARAGON  
COORDINADORA

JUAN QUINTANILLA MARTINEZ  
EDITOR



1er SEMINARIO SOBRE SITUACION Y PERSPECTIVAS DEL SECTOR ELECTRICO EN MEXICO

## **ENERGIA ELECTRICA Y MEDIO AMBIENTE EN MEXICO**



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONOMICAS  
COORDINACION DE HUMANIDADES

PROGRAMA UNIVERSITARIO DE ENERGIA  
COORDINACION DE VINCULACION  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PRIMER SEMINARIO SOBRE:  
SITUACION Y PERSPECTIVAS DEL SECTOR ELECTRICO EN MEXICO

**ENERGIA ELECTRICA Y  
MEDIO AMBIENTE EN MEXICO**

**Leticia Campos Aragón**  
*Coordinadora*  
**Juan Quintanilla Martínez**  
*Editor*

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONOMICAS  
COORDINACION DE HUMANIDADES

PROGRAMA UNIVERSITARIO DE ENERGIA  
COORDINACION DE VINCULACION  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Primera Edición: 1997

DR © 1997, Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONOMICAS

PROGRAMA UNIVERSITARIO DE ENERGIA

Impreso y hecho en México

ISBN 968-36-6476-8



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

## **Rector**

Dr. Francisco Barnés de Castro

## **Secretario General**

Mtro. Xavier Cortés Rocha

## **Secretario General Administrativo**

Dr. Leopoldo Henri Paasch Martínez

## **Abogado General**

Mtro. Gonzalo Moctezuma Barragán

## **Coordinador de Vinculación**

Fís. Sergio Reyes Luján

## **Coordinador de Humanidades**

Dr. Humberto Muñoz García

## **Director del Instituto de investigaciones Económicas**

Dra. Alicia Girón González

## **Director del Programa Universitario de Energía**

Dr. Pablo Mulás del Pozo

## CONTENIDO

Presentación <i>Juan Quintanilla Martínez</i>	1
Prólogo <i>Leticia Campos Aragón</i>	7
Introducción <i>Juan Quintanilla Martínez</i>	13
Hidroelectricidad, uso del suelo y manejo del agua <i>Lourdes Gutiérrez Canet</i>	25
La generación eléctrica en México y sus impactos ambientales: Pasado, presente y futuro <i>Juan Quintanilla Martínez</i>	33
La nucleoelectricidad y el manejo de materiales radioactivos <i>Héctor Cuapio Ortiz</i>	111
Exposición a campos electromagnéticos y su asociación con leucemia en niños <i>Arturo Fajardo Gutiérrez, Leora Velásquez Pérez y José Antonio Martínez Méndez</i>	137
La energía eléctrica en México y el desarrollo sustentable <i>Leticia Campos Aragón</i>	159
Potencial de generación eléctrica en gran escala con energía eólica en México <i>Enrique Caldera Muñoz</i>	177
Hacia un esquema de generación eléctrica distribuída con energías no convencionales <i>Jorge M. Huacuz Villamar</i>	203





## PRESENTACION

La Universidad Nacional Autónoma de México considera prioritario vincular la labor académica con las necesidades presentes y futuras del país. Corresponde a este planteamiento la creación de los Programas Universitarios, como instancias operativas que permitan intensificar el aporte de la Universidad en áreas prioritarias como la de Alimentos, Investigación en Salud, Energía, Investigación y Desarrollo Espacial, Medio Ambiente, Estudios de Género y de Estudios sobre la Ciudad.

Como parte de sus actividades, el Programa Universitario de Energía (PUE) crea el Proyecto de *Documentos de Análisis y Prospectiva* como una colección de publicaciones no periódicas, de contenido y extensión variable, que en conjunto constituya un acervo de información y un aporte original sobre la problemática de la energía, tanto a nivel internacional como en el contexto del país y de la actividad universitaria.

Se pretende recoger en primer lugar, documentos que profundicen los planteamientos esenciales hechos en los Foros de Consulta Permanente del PUE. Estos son reuniones donde un grupo limitado de expertos de los sectores académico, público y privado debaten un tema energético, con el fin de actualizar la información y proporcionar orientación para las actividades universitarias en el campo, y cuyas ponencias y resumen son publicados separadamente.

Adicionalmente, se busca recabar el material de diversa índole relacionado con el problema de la energía, con todos sus aspectos, cuyo origen puede ser:

- Estudios prospectivos comisionados o desarrollados por el PUE;
- Trabajos de investigación, documentación y análisis, efectuados independientemente por miembros de la comunidad universitaria; y,
- Trabajos realizados en los sectores público y privado que, comentados por el PUE, constituyen un aporte informativo no desperdiciado al quedar en un archivo público.

Los Documentos de Análisis y Prospectiva son sometidos a la consideración del Comité Técnico Asesor del PUE, el cual funge como Comi-

sión Editorial. El contenido de cada documento es sin embargo responsabilidad exclusiva de los autores, tanto en la información como en las opiniones vertidas.

La presente publicación constituye una colaboración más entre el Instituto de Investigaciones Económicas y el Programa Universitario de Energía, ambas dependencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, publicación que por motivo de su contenido queda enmarcada, de manera natural, en los previamente citados objetivos, propósitos y características de los Documentos de Análisis y Prospectiva.

El contenido de la publicación está formado por el material presentado, durante el *Primer Seminario sobre Situación y Perspectivas del Sector Eléctrico en México*, por estudiosos del sector eléctrico, tanto del sector mismo como de entidades académicas, públicas y privadas.

El material presentado durante el Seminario ha sido estructurado en tres grandes temas, cada uno de ellos, por razón de su naturaleza, se publica en volumen separado. Los títulos de los diferentes volúmenes son los siguientes:

- Volumen 1: La apertura externa del sector eléctrico mexicano
- Volumen 2: Experiencias concretas de innovación y aprendizaje tecnológico en la empresa Luz y Fuerza del Centro
- Volumen 3: Energía eléctrica y medio ambiente en México

El primer volumen contiene los puntos de vista, opiniones y comentarios sobre un tema de importancia central para nuestro país. Importancia que no sólo se ubica en sus implicaciones políticas y económicas, sino también en el nivel de independencia y en la seguridad y confiabilidad en el suministro de un insumo fundamental para el desarrollo de la sociedad mexicana.

La creciente industrialización del país se refleja en el rápido incremento del consumo energético. Sin embargo, la necesidad de mayor suministro de energía para satisfacer la creciente demanda a menudo conduce a otros problemas. Estos incluyen el disponer de grandes cantidades de recursos económicos para financiar instalaciones energéticas, las cuales son intensivas en capital, sin distraer capital de otras necesidades críticas para el desarrollo a la vez que se contiene con los crecientes niveles de contaminación y de degradación ambiental relacionados con la producción, transformación y consumo de energía.

Existen diversas medidas de política para dirigir, atender y, eventualmente resolver estos problemas. Algunas de estas medidas de política son o se creen bien conocidas y, al menos algunas de ellas de no fácil implantación. Por ejemplo, la privatización de algunos sistemas energéticos es una de las formas en la que los países, y México no es la excepción, de manera creciente están tratando con el problema del financiamiento.

Ciertamente, las constricciones ambientales y la reducida disponibilidad de capital para invertir en la construcción de facilidades de producción y distribución de energía -desde plataformas de perforación, refinerías, gasoductos y oleoductos hasta plantas de generación eléctrica, líneas de transmisión, etcétera- puede actuar como restricción al consumo global de energía en el país.

De hecho, se estima que el país requerirá de varias decenas de miles de millones de dólares para desarrollar la infraestructura energética necesaria en las próximas dos décadas. Asimismo, se considera que en la actualidad las inversiones relacionadas con la energía representan una parte apreciable de la inversión pública total, sin embargo están lejos de ser las requeridas por el crecimiento económico y poblacional que se prevé para el futuro a mediano y largo plazo.

Un crecimiento continuo de la energía y su acompañante demanda de capital pondrá presión adicional sobre el presupuesto nacional y podría resultar en una desviación de capital disponible para necesidades críticas, tales como educación y servicios sociales, hacia el sector energético.

Si bien es claro que muchos países en desarrollo, y México no es la excepción, están tratando de atraer capital de inversión privada (tanto nacional como extranjero) para financiar el crecimiento de su sector energético a través de la liberalización de la propiedad de las plantas de generación y de los requerimientos regulatorios, también es claro, sin lugar a dudas, que las limitaciones de capital de inversión disponible (de origen nacional y/o extranjero) continuarán siendo muy competidos y una barrera considerable para la expansión de la infraestructura energética en el futuro previsible.

Otra de las medidas y acciones de política energética que se consideran como convenientes para aminorar los efectos de la creciente demanda de energía lo constituyen las referentes a un uso más eficiente de la energía. Las vertientes en este aspecto son diversas, por ejemplo, eli-



minación de subsidios, promoción y fortalecimiento de infraestructura y dispositivos más eficientes en el uso de la energía, etcétera. Ciertamente, acciones de este tipo pueden, como se ha demostrado en otros países, ayudar a reducir, ambas, la cantidad de financiamiento y la contaminación generada.

Medidas tales como impuestos a la contaminación y apoyos para facilitar el uso de las mejores tecnologías disponibles pueden ayudar a reducir las cargas que representa la contaminación local o regional. En cierta forma, el problema no está en no saber qué hacer, sino que se ubica en encontrar y establecer la decisión política y las acciones consecuentes para llevarlo a cabo. Dada la tasa a la que la demanda de energía crecería resulta conveniente dar un cierto grado de atención a estas medidas, analizándolas en su conveniencia para el país, sus ventajas y desventajas así como sus beneficios.

Es bien sabido que una forma de reducir la demanda y el consumo energético en el país consiste en promover el cambio tecnológico (tecnologías más eficientes y desarrollo de tecnologías energéticas renovables) y la innovación tecnológica. También es claro que modificar sustancialmente los patrones de uso de la energía en el país tomará tiempo. Por otra parte, las plantas de generación tienen vidas medias largas, varias decenas de años, y que el ciclo de investigación, desarrollo y difusión de una tecnología es también largo en el tiempo. Todos estos elementos pesan, fuertemente, en contra de una rápida modificación de los patrones de uso de la energía.

Aún con reformas exitosas a las políticas energéticas y un genuino y real esfuerzo de desarrollo y adopción de tecnologías energéticas eficientes y el desarrollo de fuentes alternativas de energía, es de esperarse que el crecimiento del consumo de energía sea considerable en las próximas décadas. Sin embargo, sin tales medidas (e incluso otras no mencionadas en esta breve presentación) el crecimiento del consumo sería significativamente más rápido y los niveles de contaminación más altos.

Es preciso recordar que el concepto de desarrollo sostenible se encuentra sujeto a una fuerte incertidumbre tanto desde el punto de vista de su cuantificación como de su misma definición. Así pues el desarrollo sostenible podría consistir en adoptar estrategias y desarrollar actividades que permitieran la consecución de los objetivos de desarrollo, protegiendo, al mismo tiempo, los recursos naturales y humanos y ligando la producción de bienes o la prestación de servicios con la reducción del

consumo y la preservación del medio ambiente. Desarrollo que sea compatible con las necesidades de las generaciones futuras.

Algunas de las estrategias que el sector eléctrico habrá de analizar y, en su caso, implantar en pos del desarrollo sostenible se ubican en la mejora de la eficiencia en todas las fases del ciclo de producción, transporte, transformación, distribución y uso de la electricidad, ahorrando recursos energéticos y financieros y conservando la energía. Estas estrategias abarcan tanto la creación y diseminación de nuevas tecnologías como la puesta en marcha de sistemas de gestión e información dirigidos a una explotación eficiente.

En primer lugar, en la fase de utilización final de la electricidad, los esfuerzos se centran, por un lado, en favorecer la utilización por parte del usuario final de equipos y aparatos eléctricos de alto rendimiento, con el consecuente ahorro de recursos energéticos. Por otro lado es necesario hacer referencia al ahorro de recursos energéticos y financieros conseguidos mediante acciones en la gestión de la demanda, como, por ejemplo, los programas de formación y asesoramiento a usuarios sobre uso racional de la energía, las medidas de aislamiento térmico y climático de edificios, de racionalización de iluminación de edificios y sistemas de calefacción y aire acondicionado en las regiones del país que lo requieran, etcétera.

En segundo lugar, en las fases de transporte, transformación y distribución, el fin de las acciones a desarrollar es la disminución de las pérdidas de energía.

Finalmente, en la fase de generación de electricidad, la mejora de eficiencia implica acciones tales como: la conservación y modernización continua de los activos de las empresas eléctricas; la promoción de tecnologías más eficientes con el consecuente ahorro de recursos energéticos y financieros; la promoción y desarrollo de tecnologías limpias de escaso impacto ambiental, etcétera.

La aplicación de algunas de estas tecnologías y sistemas de gestión requiere aún de un considerable esfuerzo de inversión en actividades de investigación, desarrollo y demostración.

El concepto de desarrollo sostenible, en el que los objetivos de rentabilidad de la empresa eléctrica, seguridad en el suministro y respeto por el medio ambiente puedan hacerse compatibles, reclama la búsqueda constante de la eficiencia en todos los procesos de la cadena del negocio eléctrico. La búsqueda de la eficiencia exige, a su vez, otorgar a la ges-

ción medio ambiental un papel central en la explotación del negocio eléctrico, en el que la creación y difusión de tecnologías y sistemas de gestión de alto rendimiento, ahorradores de recursos naturales y financieros debe recibir la máxima prioridad.

Ante la problemática esbozada en párrafos anteriores, los dos volúmenes restantes abordan los aspectos tecnológicos y ambientales resultantes de la generación eléctrica en México. El segundo volumen contempla algunos de los esfuerzos de innovación y aprendizaje tecnológico en Luz y Fuerza del Centro, S. A., empresa que proporciona servicio eléctrico a la ciudad más grande del país. En tanto que el tercer volumen lo hace con los aspectos ambientales relacionados con la generación y uso de la energía eléctrica en México, e incluso algunos de los posibles efectos sobre la salud provenientes de la transmisión y distribución y uso de la electricidad.

Finalmente, es opinión del editor que el material vertido es esta publicación, representa un documento valioso por la información, análisis y elementos de base para los estudiosos y tomadores de decisiones relacionados con la problemática energético-ambiental del país, así como para los involucrados con las políticas y acciones en el sector energético del país y en particular con el sector eléctrico en México.

El Editor  
Dr. Juan Quintanilla Martínez



## PROLOGO

Uno de los graves problemas que enfrenta el planeta tierra es, sin duda, la contaminación creciente de los suelos, las aguas y la atmósfera producto de la acción indiscriminada de los seres humanos hacia la naturaleza que ponen en peligro la única vida que se tenga noticia en nuestra galaxia. En el impacto ambiental contribuyen tanto los países del norte como los del sur del planeta. Los primeros por su alta industrialización, son los principales perturbadores del medio ambiente al ocupar un lugar de privilegio como generadores y consumidores de energía en el mundo; los segundos, por su pobreza y el rápido crecimiento de su población y su urbanización acelerada, también contribuyen, aunque en menor escala, a la perturbación del medio ambiente. Son estos países los que explotan forestalmente sus tierras para satisfacer las necesidades de madera de los países ricos. Los bosques también son quemados para crear espacios para el pastoreo y satisfacer las necesidades de carne de esos países. Otra causa de la deforestación en esta región del planeta es la necesidad que los países del sur tienen de cortar leña para utilizarla como combustible.

Según René Dummont<sup>1</sup>, en el año 2010, la cubierta forestal del globo habrá disminuido en más de 40 por ciento con respecto a 1990 y en el 2040, la acumulación de gases con efecto de invernadero podría provocar un aumento de uno a dos grados de la temperatura promedio del planeta y una elevación de 0.2 a 1.5 metros del nivel de los océanos. En esto último, el autor reconoce que no hay certidumbre científica pero sugiere no esperar a que la haya y actuar antes de que sea demasiado tarde.

La generación de electricidad mediante combustible fósil no renovable es una de las fuentes importantes de contaminación del medio ambiente al arrojar gases de efecto invernadero (dióxido de carbono y óxido nitroso); gases causantes de las lluvias ácidas (anhídrido sulfuroso y óxido de nitrógeno) y partículas sólidas. En la transmisión y distribución de dicho fluido el impacto ambiental es menor respecto a la generación por lo que ha sido poco estudiado. De ahí la importancia de uno de los trabajos que se compila en este libro en el que se maneja la hipótesis de leucemia en niños por determinados gradientes de exposición a campos electromagnéticos que

<sup>1</sup> Dummont, René, *Famines, le Retour*, Ed. Politis Arléas, Paris, 1997.

producen las líneas eléctricas.

En su utilización, en cambio, la electricidad es muy limpia, segura y versátil. De ahí el alto porcentaje de la demanda de dicho fluido a nivel nacional la cual durante el período 1937- 1996 se ubica en promedio anual en 7.3 por ciento.

Este libro responde a la necesidad de encontrar respuesta al ¿cómo satisfacer las crecientes necesidades de energía eléctrica del país sin contaminar el medio ambiente y utilizando racional y eficientemente la energía? Esta pregunta se inscribe dentro del nuevo paradigma de crecimiento que establece que éste debe ser socialmente equitativo, ambientalmente viable y económicamente eficiente, de tal manera que las generaciones futuras hereden un medio ambiente de una calidad por lo menos igual a la que recibieron las generaciones anteriores.

Queda claro que ninguna fuente de generación eléctrica está exenta de producir impactos ambientales y su selección no sólo depende del aspecto técnico sino del económico y el político. ¿A quién le corresponde la elaboración y puesta en práctica de una política energética que potencie la actual estructura industrial del sector eléctrico; asegure suficientes inversiones mixtas (capital privado y estatal) para la instalación de centrales de generación eléctrica óptimas en el mediano y largo plazo; asegure la combinación de las tecnologías de generación que ofrecen las distintas fuentes energéticas y el uso eficiente de la energía eléctrica?, sin duda alguna, al Estado, pero el modelo económico que domina crecientemente nuestro país desde 1982, no le permite a éste llevar a cabo esa magna tarea. Los distintos ideólogos de la economía de mercado aunque aceptan la necesidad de reducir el impacto ambiental insisten en la necesidad de que nuestra economía se autoregule sobre todo a través de la competencia abierta. En este tipo de economía de mercado pura, al Estado le corresponde proporcionar los servicios necesarios para el funcionamiento de las empresas privadas y la protección a los miembros débiles de la sociedad. De ahí que durante el sexenio de Carlos Salinas de Gortari se haya iniciado la apertura del sector eléctrico mexicano creando condiciones de competencia en la generación y en la distribución y al mismo tiempo se haya creado el Programa de Electrificación Rural con energías renovables el cual pese a ser el más grande y dinámico del mundo sólo ha electrificado 1 200 de las 80 mil comunidades agrarias con menos de 1 000 habitantes cada una, comunidades que en plena época tecnocrática carecen de electricidad.

Según Jorge Huacuz, investigador del Instituto de Investigaciones Eléctricas, este programa que está llevando a cabo el gobierno de la República, actúa en casi la mitad de los Estados del país. En el Estado de Nayarit, por ejemplo, existe una pequeña iglesia que se está abasteciendo de electricidad a través de energía solar y una serie de esquemas de uso eficiente dentro de la iglesia que rompe con el esquema de diseño convencional de instalaciones eléctricas. Ya hay cerca de 50 mil sistemas domésticos instalados, más de 700 clínicas, más de 600 sistemas comunitarios, radiotelefonía con sistemas fotovoltaicos, más de 12 mil estaciones y repetidoras en todo el país. Al sur de Cancún se construyó un hotel ecoturístico en el cual se utilizan sistemas híbridos (por sistema híbrido se entiende la combinación de energía solar, eólica o microelectricidad, con una fuente convencional como el motor de combustión interna, por ejemplo). Se trata de un proyecto piloto realizado con inversión nacional y tecnología mexicana. Este tipo de proyectos fue muy defendido durante el Seminario por quienes, conscientes de que este tipo de comunidades no van a ser incorporadas al mercado mundial, apoyamos la idea de impulsarlas con nuevas formas de producción, ni siquiera dirigidas al mercado nacional sino al local y aprovechar sus tierras ociosas para elevar el empleo; los salarios reales de esas poblaciones y en consecuencia el consumo. De ahí la importancia de su electrificación.

Lo cierto es que la reducción del impacto ambiental por generación de electricidad es un problema que no sólo depende de la tecnología empleada sino también, como se puede ver en el siguiente cuadro, de la población y la producción de bienes y servicios del país. Si México quiere elevar su productividad no debe disminuir el consumo de electricidad, sino al contrario. Lo que tampoco significa que la utilización de electricidad en el país no sea más racional y eficiente. Sobre todo si los principales países generadores de electricidad del mundo no están disminuyendo ni su generación, ni su consumo. En particular, Estados Unidos de Norteamérica tampoco ha cumplido con el compromiso que adquirió en la cumbre de la Tierra de Río en 1992 de reducir sus emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera e incluso, recientemente, propuso regresar al nivel de 1990 hasta el año 2012 e instaurar a partir del 2008 unos "permisos para contaminar" negociables<sup>2</sup>.

De los países de la Comunidad Económica Europea seleccionados y mostrados en la Tabla 1, la población de México sólo es superada por la de

<sup>2</sup> Le Monde Diplomatique, *Aliviar al Planeta*, Año 1, N° 6. México, 1997.

Japón y la de Estados Unidos. Sin embargo al observar el consumo final per capita de electricidad, nuestro país alcanza el nivel más bajo de la lista (1.28 TWh) superado en tres veces por Inglaterra, cuatro por Francia, cinco por Japón, diez por Estados Unidos y trece por Canadá.

**Tabla 1**

**COMUNIDAD ECONOMICA EUROPEA POR SELECCION DE PAISES  
1994**

País	Población	PNB	Producción bruta de electricidad <sup>1</sup>	Consumo final de electricidad <sup>2</sup>	Consumo per capita de electricidad
	<i>millones de 1990</i>	<i>billones de dólares</i>	<i>TWh</i>	<i>TWh</i>	<i>TWh</i>
Estados Unidos	261.00	6 027.10	3 473.60	2 942.60	11.27
Japón	124.96	3 100.20	964.30	846.50	6.77
Canadá	29.25	601.40	554.20	435.20	14.88
Francia	57.90	1 235.40	476.20	335.50	5.79
Inglaterra	58.30	1 009.50	325.40	288.50	4.95
México	93.01	270.70	147.90	119.00	1.28

<sup>1</sup> Producción bruta se refiere a la pública total y autoproducción.

<sup>2</sup> Consumo Final= Oferta de energía eléctrica menos pérdidas por transmisión y distribución menos consumo del sector energía.

Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por OECD, Electricity Information 1995, July 1996.

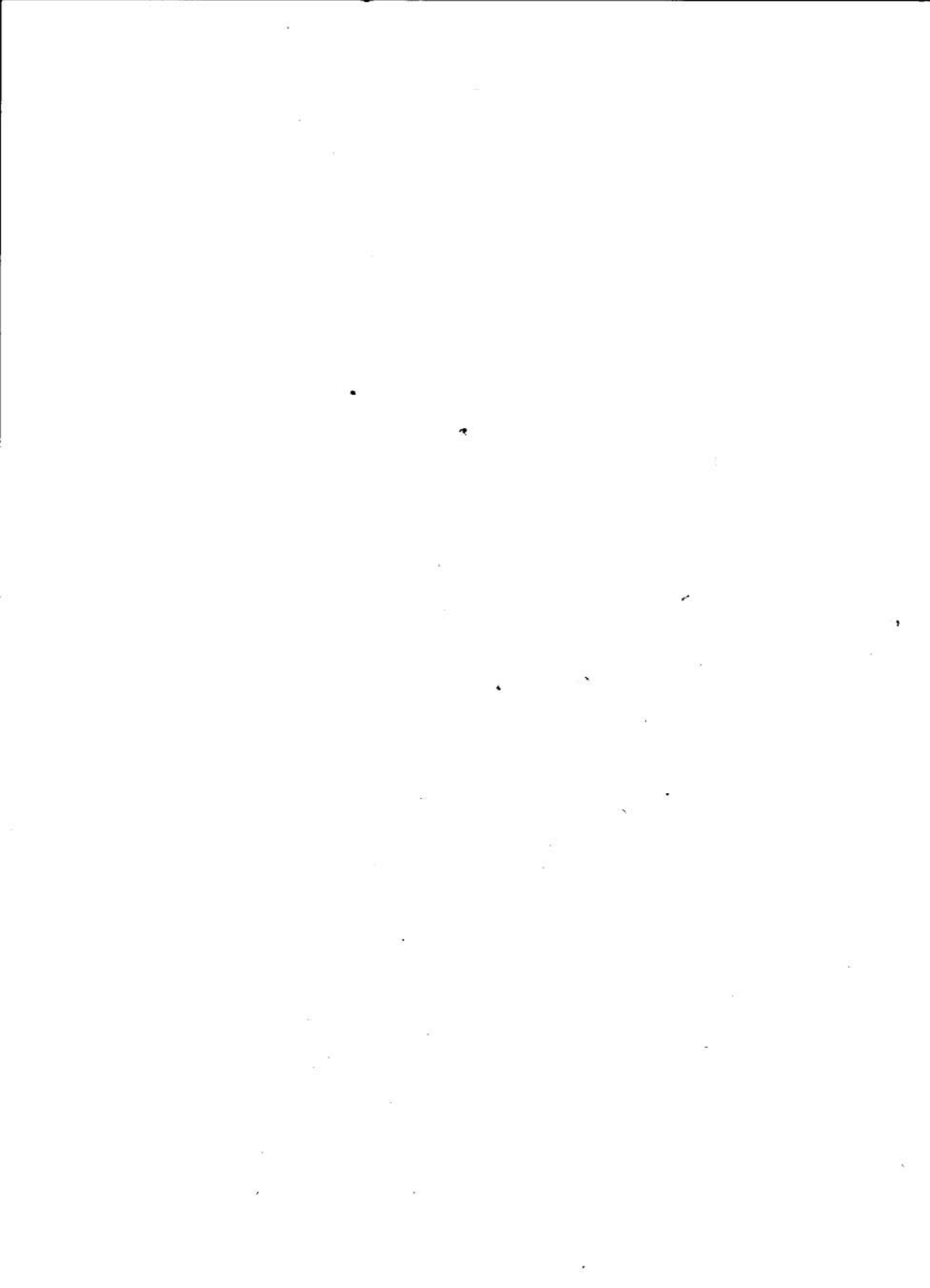
De ahí una primer explicación al por qué las centrales eléctricas que se nutren de combustibles fósiles en nuestro país no pueden ser cambiadas de un día para otro pues esta opción tecnológica es la que le resulta más barata para generar electricidad máxime si a diferencia de otros países del mundo, México tiene combustible fósil para generar electricidad. Lo que tampoco significa que el impacto ambiental de este tipo de centrales no deba minimizarse al máximo como se está intentando hacer por las empresas generadoras de electricidad del país.

La apertura externa del sector eléctrico mexicano sobre todo en la fase de la generación exige urgentemente una legislación ambiental más estricta que impida que los costos de la contaminación y daño ambiental generado por las distintas centrales generadoras de electricidad, sean

éstas de propiedad privada, estatal o mixtas, al no tener que ver con la rentabilidad microeconómica de las empresas se diseminan como "externalidades" a través de la sociedad. Del Estado depende que dichas externalidades sean realmente pagadas por quienes las ocasionaron. ¿Podrá el Estado mexicano en el ámbito de una economía de mercado internalizar los costos ambientales de las empresas privadas que generen electricidad en nuestro país? Ya lo veremos. Por lo pronto, vale la pena reiterar la urgente necesidad que tiene el país de la elaboración y puesta en práctica de una política energética que potencie la actual estructura industrial del sector eléctrico; asegure suficientes inversiones mixtas (capital privado y estatal) para la instalación de centrales de generación eléctrica óptimas en el mediano y largo plazo; combine las distintas tecnologías de generación que ofrecen la variedad de fuentes energéticas y asegure el uso eficiente de la energía eléctrica, Gobernar significa saber prever.

Finalmente quisiera agradecer en este prólogo, el apoyo de la Directora del Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM, Doctora Alicia Girón González para que la que esto escribe coordinara el Primer Seminario sobre Situación y Perspectivas del sector Eléctrico en México del tres al seis de diciembre de 1996 en dicho instituto. Del seminario resultaron tres libros: La Apertura Externa del Sector Eléctrico Mexicano (Tomo I); Experiencias Concretas de Innovación y Aprendizaje Tecnológico en la Empresa Luz y Fuerza del Centro (Tomo II) y Energía Eléctrica y Medio Ambiente en México que es el tomo que el lector tiene en sus manos. Libros editados por el Instituto de Investigaciones Económicas y el Programa Universitario de Energía de la UNAM. Al Director de este Programa, Dr. Pablo Mulás del Pozo y al subdirector del mismo, Dr. Juan Quintanilla Martínez les agradezco una vez más su decidido apoyo en la edición de esta obra.

La Coordinadora  
Leticia Campos Aragón



## INTRODUCCION

Conforme la raza humana se prepara para adentrarse en una nueva centuria, frecuentemente se escuchan comentarios y cuestionamientos respecto a la fragilidad y al peligro en que se encuentra nuestro planeta. Si bien la frase anterior resulta exagerada en alguna medida no deja de ser preocupante. La tierra con cinco mil millones de años y a través de las eras geológicas ha sufrido el bombardeo de meteoros, cambios abruptos en su campo magnético, rearreglo de su distribución de masas terrestres, retiro masivo de los hielos y reconformación de su superficie. La vida en la tierra también ha probado ser resistente. Desde que aparecieron las primeras formas de vida, hace más de 3 500 millones de años, las diferentes especies biológicas han aparecido y desaparecido, sin embargo la vida ha persistido, al parecer, sin interrupción. De hecho, no importa lo que los humanos hagamos, no es probable que podamos suprimir las poderosas fuerzas físicas y químicas que gobiernan e impulsan el sistema tierra.

Aún cuando no podemos perturbar completamente el sistema tierra, si lo afectamos de manera significativa conforme usamos la energía y emitimos contaminantes en nuestro esfuerzo para proporcionar alimento, abrigo y una multitud de productos para una población mundial creciente.

En este esfuerzo liberamos químicos que afectan la capa de ozono que nos protege de la peligrosa radiación ultravioleta y quemamos combustibles que emiten gases que atrapan el calor y se concentran en la atmósfera. Este crecimiento poblacional puede sobre pasar el potencial agropecuario de la tierra. Afectamos selvas tropicales, habitat natural para millones de especies, para la agricultura y ganadería. Extraemos materias primas de la tierra para alimentar la maquinaria de la creciente economía mundial y tratamos a la atmósfera, tierra y aguas como receptáculos de los desechos que generamos conforme consumimos energía y bienes en nuestra vida diaria.

La evidencia científica y la teoría indican que como resultado de tales actividades el medio ambiente global está sufriendo profundos cambios. En esencia, podemos decir que estamos conduciendo un experimento no controlado con el planeta.

Los cambios que está experimentando hoy en día se distinguen de



los del pasado en la escala de ellos y la rapidez con la que están ocurriendo o probablemente ocurran. Geológicamente hablando, en el pasado, las condiciones en la atmósfera, océanos y biosfera han seguido su ciclo natural. Ahora, las actividades humanas constituyen una fuerza impulsora de cambio en el medio ambiente global.

Ciertamente, el ser humano ha afectado por largo tiempo su medio ambiente local, pero es durante el presente siglo, particularmente durante los últimos 50 años, que el ámbito de su influencia se ha extendido a la escala global. Ahora es claro que con actividades humanas sistemáticamente repetitivas, aparentemente inocuas, como es el manejar un automóvil o cortar un árbol, podemos afectar los sistemas físicos y químicos que gobiernan la tierra. Así, con la deposición ácida alteramos la química del suelo y afectamos el balance químico natural de ríos y lagos en el mundo y los efectos de las emisiones contaminantes en una parte del mundo pueden ser sentidos en otra parte del mismo. Los clorofluorocarbonos producidos y emitidos por los países industrializados se elevan hacia la estratósfera, donde, al igual que otros contaminantes, se dispersan sin importar fronteras geográficas o políticas. Cuando parte de una área de bosque es desmontada y usada para la ganadería o agricultura, se afectan comunidades de plantas y animales (en el caso de especies con un habitat limitado y específico representa su eliminación).

Nuestras actividades ya han causado cambios en la composición de la atmósfera terrestre, quizás, los más importantes se ubican en el cambio notable de las concentraciones en la atmósfera de gases como dióxido de carbono, metano, óxidos nitrosos y clorofluorocarbonos. Desde los inicios de la historia terrestre, algunos de estos gases han tenido un importante papel en el principio conocido como "efecto invernadero". Burdamente hablando, en forma análoga a los paneles de vidrio de un invernadero, los gases retienen algo del calor de la tierra impidiendo que escape a través de la atmósfera y con ello tienen el potencial de calentar la superficie terrestre. La concentración atmosférica de dióxido de carbono -después del vapor de agua el más abundante gas de invernadero- se ha incrementado en forma significativa debido a la quema de combustibles fósiles en los pasados 100 años. Conforme se desmontan selvas y bosques, los cuales absorben dióxido de carbono durante su crecimiento, y los árboles y ramas son quemados o decaen, se liberan a la atmósfera cantidades de dióxido de carbono que ordinariamente serían almacenados.



Si ocurriera el calentamiento de la superficie de la tierra -y hay que ser claro desde el punto de vista científico ésto se ubica en el ámbito de una posibilidad- como consecuencia de cambios en la composición de la atmósfera se podrían presentar otros cambios a escala regional y/o global. Se habla de elevación del nivel del mar como consecuencia de la fundición de las capas de hielo y expansión de los océanos, así como desplazamiento de los cinturones agrícolas.

Bosques y otros ecosistemas pueden experimentar un rompimiento violento como consecuencia de la respuesta de plantas y animales ante alteraciones amplias de temperatura y condiciones hidrológicas, así como del hecho de que las diversas clases de plantas se ajustan de maneras diferentes ante incrementos en los niveles de dióxido de carbono. Cambios rápidos en el clima pueden causar escasez regional de alimentos, crear olas de refugiados ambientales y con ello poner en peligro la seguridad de otros países conforme los efectos afecten la economía mundial. Sin embargo, quizás no todos los cambios sean malos. Algunos países ubicados en latitudes altas pueden experimentar incrementos en sus zonas agrícolas y beneficiarse de climas más calientes.

Con los cambios físicos, químicos y biológicos que los humanos estamos causando en el sistema terrestre no es de esperar que no ocurran más sorpresas como es el caso del agujero en la capa de ozono. Los químicos atmosféricos han apuntado que, independientemente de los años de estudio, no hay manera de predecir que no se forme cada año un agujero en la capa protectora de ozono. Más bien, es probable que, independientemente de cual sea el avance del conocimiento científico en el tema, se presenten eventos inesperados de gravedad comparable o aún mayor.

Es claro que las transformaciones del medio ambiente global son impulsadas por el crecimiento poblacional, el creciente desarrollo económico y su acompañante incremento en la actividad industrial y el consumo de energía.

De estos factores, el crecimiento poblacional resulta ser el más fácilmente cuantificable. Desde 1900, el número de personas en el mundo se ha triplicado y en 1987 se incorporó a la sociedad mundial el habitante número 5 000 millones. La población mundial se está incrementando en cerca de 90 millones de personas por año y, de acuerdo con las proyecciones de las Naciones Unidas, se estima alcanzar la cifra de 10 000 millones para finales del siglo XXI. Noventa por ciento de la población nacerá en los países pobres del mundo hoy en vía de desarrollo.

Si bien la población se ha incrementado, también lo han hecho los estándares de vida de muchas gentes en la tierra así como el consumo de combustibles fósiles y la expansión de la economía mundial. Estos cambios han permitido notables mejoras en el bienestar humano, pero a un costo. Desafortunadamente, muchos de los procesos que producen bienestar, en el sentido más amplio de concepto, también degradan el ambiente y reducen el capital ecológico -suelos, bosques, especies, recursos de agua, etcétera- sobre los cuales descansa el progreso y bienestar de la humanidad.

Una cuarta parte de la población mundial se ubica en los países ricos, países desarrollados, y consume la mayor parte de la energía producida en el mundo. Disfrutan de cerca del 80 por ciento del bienestar mundial, hace uso de la mayor parte de los recursos naturales y genera la mayor parte de los desechos. La mayor parte de los gases de invernadero y de los químicos que están cambiando la composición de la atmósfera terrestre -y con ello contribuyendo al posible cambio climático y a otros cambios tales como la lluvia ácida- han sido y están siendo emitidos por las naciones industrializadas en el hemisferio norte.

Por otra parte, las tres cuartas partes restantes de la población mundial se ubican en los países en vía de desarrollo y disponen de menos de la cuarta parte del bienestar mundial. Sin embargo, estos millones de gentes en los países en vía de desarrollo también contribuyen al agotamiento de recursos y a las tensiones ambientales. La pobreza y el hambre a menudo los obligan a destruir su medio ambiente -por la tala de los bosques y selvas y el agotamiento de los suelos- para sobrevivir.

En el mundo en vía de desarrollo, mejorar los estándares de vida puede llevar al rompimiento del ciclo de rápido crecimiento de la población y de los peligros que ésta representa. La experiencia, país tras país, muestra que el desarrollo económico, cuando se acompaña con mejores oportunidades de empleo y educación, eventualmente conduce a menores tasas de natalidad.

También podemos reconocer que si estas tres cuartas partes de la humanidad en las ahora naciones en vía de desarrollo intentan crear bienestar haciendo uso de los mismos métodos del pasado, en algún momento el resultado será un daño ecológico mundial a todas luces inaceptable. Estos países representan, ahora, una cuarta parte de las emisiones totales de gases de invernadero y si se toman las mismas vías de desarrollo que tomaron en el pasado los países desarrollados, esta contribu-

ción podría duplicarse para mediados del próximo siglo.

El prospecto de un desmedido cambio ambiental global da lugar a algunas preguntas difíciles o problemáticas de contestar. Preguntas que involucran el concepto de equidad, concepto y palabra que los líderes mundiales no pueden ni deben ignorar más. En tanto que beneficios y sacrificios estarán o están distribuidos de manera inequitativa, ¿cuál es la responsabilidad de las naciones (las que tienen) que crearon muchos de los problemas y cuál es la de las naciones (las que no tienen) que buscan el desarrollo con objeto de satisfacer las necesidades de su gente? ¿es equitativo esperar que las naciones pobres en su búsqueda de mejores estándares de vida para sus gentes lo deban llevar a cabo bajo controles ambientales mucho más fuertes que aquellos con los que (si es que hubo alguno) las naciones desarrolladas lograron su rápido crecimiento industrial? Y lo que es más, ¿cuál es la responsabilidad de las personas que ahora viven en la tierra para con las futuras generaciones?

Otro elemento que habrá de tomarse en cuenta es la potencial explosión de tensiones derivadas del posible cambio ambiental global, tensiones que se vislumbra se verían agravadas por la ampliamente difundida percepción de que las mayores cargas caeran sobre los países en desarrollo del Sur y que los principales culpables de la generación de estos problemas, en ambos sentidos a través de sus acciones y de su falta de acción, son los países desarrollados del norte. Ciertamente, el diálogo podrá reducir las tensiones, sin embargo deberá haber una decidida acción y compromiso por parte de las naciones desarrolladas si quieren que las naciones en vía de desarrollo puedan, aunque sea en mínima medida, sumarse a los esfuerzos.

No es de sorprenderse que el futuro del medio ambiente global y las consecuencias de los posibles cambios constituyan un nuevo tipo de moneda o de valor monetario, esto al menos en los círculos o desde la óptica de la política. Como se recordará en 1987 la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo emitió el reporte denominado *Our Common Future*. Este reporte representó un parteaguas en la historia de la humanidad. De hecho, la problemática central de la llamada Comisión Brundtland se ubicó en la pregunta ¿Es posible satisfacer las necesidades de los 5 000 millones de personas que viven ahora en el mundo sin comprometer la capacidad futura de generaciones aún más numerosas para satisfacer sus propias necesidades? La respuesta de la Comisión Brundtland fue un categórico sí. El terrible pero muy real prospecto de

que el futuro de la humanidad dependa de un medio ambiente aún más contaminado, degradado y desprovisto de los recursos ecológicos requeridos para reducir y/o eliminar la pobreza, peligro que difícilmente podría ser alejado si el desarrollo económico y social no son transformados. De ahí que la Comisión invocase el concepto de desarrollo sustentable en el esfuerzo de describir los medios por los cuales el progreso económico y social podría ser alcanzado sin comprometer la integridad del medio ambiente.

Ahora bien, el concepto de desarrollo sustentable no es nuevo, sin embargo su importancia ha estimulado a gobiernos, políticos y tomadores de decisiones, moralistas y otros, a lo largo y lo ancho del mundo, a analizar y reconsiderar sus implicaciones. De particular interés es la consideración de la integración medio ambiente y economía. En este sentido resulta importante reconocer que solamente el crecimiento puede eliminar la pobreza y crear la capacidad para resolver los problemas ambientales. Sin embargo, el crecimiento no puede estar basado en la sobreexplotación de los recursos de los países en desarrollo. Deberá ser manejado de tal forma que acreciente la base de recursos sobre la cual todos estos países dependen.

Si esta nueva doctrina es la que ha de gobernar los caminos hacia el crecimiento y desarrollo, también es claro que se habrán de tomar decisiones dolorosas en cuanto a cómo explotaremos los recursos, las inversiones directas, el desarrollo de tecnologías y la organización de nuestras instituciones. Sin embargo, las naciones desarrolladas deberán reconocer que la continuación de su prosperidad depende, en parte, de la capacidad de la tierra para proporcionar los alimentos y otros recursos y que esto a su vez requiere de incrementar la prosperidad y seguridad del mundo en vía de desarrollo.

Esta visión de desarrollo trae a colación infinidad de argumentos, los cuales son de carácter provocativo y por ello merecen una profunda reflexión. Por ejemplo, la imposición de un costo a los bienes que refleje los costos ambientales de su producción y uso. Tal es el caso de la gasolina, la cual podría ser gravada para reflejar los costos del daño que el quemado de este combustible causa a través de la contaminación y el incremento del riesgo de cambio climático. De la misma manera, el precio de los fertilizantes podría reflejar el costo de limpiar las fuentes de suministro de agua que contaminan. Otro argumento se ubica en la reestructuración de las instituciones con el propósito de reflejar las prioridades am-

bientales. Esto implicaría que los aspectos ambientales de la política deberían ser considerados al mismo tiempo como lo son las cuestiones de economía, comercio, energía y agricultura. En el aspecto institucional las agencias ambientales nacionales deberán disponer de mayor poder para redefinir y redirigir las políticas que por ahora parecen conducir a la degradación ambiental. Por otra parte, las agencias gubernamentales responsables de la economía, el comercio y otras actividades fuertemente relacionadas con los recursos presupuestales y de poder deberán ser obligadas, por mandato, a desarrollar políticas que fomenten un desarrollo sustentable y sean responsables ante sus gobiernos y la sociedad de las consecuencias ambientales de sus políticas y destino de los recursos a su cargo.

Cualesquiera que sean los pasos a dar para detener el cambio global, es necesario para los países en desarrollo el disponer de apoyo financiero fresco para poder pagar los esfuerzos de reducción de las tasas de crecimiento de la población, restaurar y mantener sus recursos naturales y adoptar modernas tecnologías que sean menos contaminantes que las ya desechadas en el mundo industrializado. Sin embargo, este apoyo financiero no podrá ser seriamente tomado en cuenta hasta que la situación de la deuda externa de los países en desarrollo sea resuelta. El problema de la deuda externa es central para los países en desarrollo, particularmente en América Latina y África, toda vez que el servicio de la deuda les representa cantidades mucho mayores que lo que reciben en ayuda.

Los gobiernos, los industriales, los científicos y el público en general habrán de considerar en detalle las implicaciones de las sugerencias mencionadas y otras más, es cada vez más claro que las decisiones que hagan posibles estos ajustes habrán de requerir de más estrechas conexiones entre la ciencia en general y la política.

Nadie duda que la tierra ha sido comprometida hacia un mayor cambio medio ambiental en los años venideros. Las elevadas concentraciones de gases de invernadero originadas por las actividades humanas persistirán por muchos siglos, no importando lo que hagamos. Los clorofluorocarbonos presentes hoy en día en la atmósfera continuarán reduciendo la capa de ozono por siglos. Los ecosistemas tropicales complejos, una vez limpiados, se pueden, en el mejor de los casos, regenerar muy lentamente. La magnitud y rapidez del cambio dependerá de cuándo la sociedad humana decida actuar para reducir la acumulación de dióxido

de carbono y gases traza en la atmósfera, revertir la deforestación y cortar las emisiones contaminantes. Los pasos requeridos para bajar la rapidez del cambio y, si es necesario, adaptarse a él será costoso, pero tal vez sea más costoso el no hacer nada. Puesto en otras palabras, si la sociedad humana elige esperar una década o aún más tiempo, estaremos enfrentando un riesgo mucho más alto, tendremos que adaptarnos a un cambio climático mucho mayor que aquel al que tendríamos que adaptarnos si actuamos desde ahora, de manera más vigorosa, en la reducción de la acumulación de gases de invernadero.

Ante tanta incertidumbre científica, social y política hay una serie de aspectos que resultan prometedores y motivantes. Así, por ejemplo, los demógrafos reportan que las tasas de natalidad de muchos países están declinando. La ratificación del Protocolo de Montreal por gran número de países proporciona un modelo de cooperación que trasciende fronteras e intereses. En algunos países está decreciendo la cantidad de energía y materiales requeridos para producir una cantidad dada de bienes de producción y consumo.

Los científicos pueden proporcionar información que de base a las decisiones, pero cuándo actuar para reducir la rapidez del cambio en el medio ambiente, es o constituye un juicio de carácter social y no sólo científico. Dentro del ámbito científico existe un amplio consenso que aún ante datos incompletos e incluso contradictorios, son posibles y recomendables las medidas que permitan facilitar la adaptación a los potenciales cambios e incluso reducir la rapidez de los cambios ya en curso. Pasos tales como la mejora de la eficiencia energética y el desarrollo de alternativas a los combustibles fósiles no sólo podrían reducir la rapidez del calentamiento sino que podrían darnos tiempo para estudiar el cambio climático y evaluar sus impactos.

En última instancia, el resultado dependerá de la voluntad y decisión política. Los cambios sociales, políticos y económicos serán enormes y los retos para los políticos y el gobierno se ubicarán, entre otros, en trasladar la aceptación de un conjunto de valores, tales como la necesidad de proteger el medio ambiente, en acciones reales y no quedar en grandes pronunciamientos que no resuelven el problema.

Los retos medio ambientales descritos son difíciles, sobre todo en un mundo que se encuentra sumergido en otros más costosos y obvios problemas de economía, seguridad y bienestar público. Sin embargo, no hay duda que el cambio global en el medio ambiente constituirá la pro-



blemática internacional más presionante en el siglo venidero.

Finalmente, la cuestión central se ubica en ¿tenemos el suficiente conocimiento -así como aquellos que establecen las políticas ambientales, económicas y sociales- para decidir cuándo reducir la rapidez con la que emitimos gases de invernadero y, por consecuencia, la rapidez de calentamiento global?

Si bien hay que reconocer que hay muchas incertidumbres también hay que reconocer que la respuesta más razonable es un sí precautorio porque entre más rápido sea el cambio en el clima, más difícil será para las sociedades y ecosistemas el adaptarse. En todo caso los problemas que se vislumbran demandan al menos atención y las posibles acciones, aún cuando nunca ocurran las proyecciones del calentamiento global.

Parece haber llegado el momento, o al menos estar próximo, de considerar acciones políticas prudentes en al menos tres áreas: prevención, adaptación e investigación.

En el aspecto de la prevención la política energética juega un papel central. Parte de esta política deberá contemplar el estar preparados para la posibilidad de que el uso de combustibles fósiles se tenga que reducir en los años venideros y por ello deberemos explorar los medios para reducir la demanda de energía sin impedir el crecimiento económico. Una posibilidad para lograr esto se ubica en usar los combustibles fósiles en una forma mucho más eficiente y crear los incentivos y otros medios para incrementar el uso de combustibles fósiles más limpios. Tal es el caso del gas natural. Sin embargo, habrá que tener en cuenta la disponibilidad de gas natural y su valor como materia prima para la industria química y petroquímica.

Ciertamente, es recomendable establecer y hacer una realidad programas vigorosos de investigación y desarrollo de fuentes de energía que no producen dióxido de carbono. En este aspecto nuevas tecnologías en reactores nucleares (reactores seguros) que sean aceptables por el público deberán ocupar lugar importante en un programa de investigación y desarrollo sobre fuentes alternativas de energía. La geotermia, eólica, solar y otras fuentes renovables de energía necesitan ser reexaminadas para determinar si el progreso reciente ha mejorado su factibilidad económica.

Las políticas de desarrollo de una nación impactarán su propio medio ambiente y con ello el medio ambiente global. Estos impactos dependen del nivel de población, el estándar de vida y las tecnologías que

emplea para soportar dicho nivel de vida. El crecimiento incontrolado de la población junto con la búsqueda de niveles de vida mejores con tecnologías ineficientes sólo puede llevar a un continuado deterioro de los medios ambientes local y global. Por ello las políticas de ayuda para el desarrollo deberán enfocarse a la mejora y establecimiento de una base científica y de conocimiento tecnológico, así como de una infraestructura que constituyan una sólida fundamentación para un desarrollo económico ambientalmente sustentable de los países en vía de desarrollo.

En cuanto a la adaptación y tomando en cuenta que por el momento no podemos predecir la evolución detallada de los cambios esperados, las políticas deberán buscar la forma de mejorar la resistencia, fortaleza y el grupo de opciones de los sectores que más probablemente se vean afectados. En este aspecto, las opciones de adaptación para las naciones ricas y tecnológicamente avanzadas son muchas, no así en las naciones pobres.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la falta de un conocimiento y comprensión científica suficiente para predecir de manera confiable la evolución detallada de los cambios globales y regionales del medio ambiente hace imperativo disponer de un fuerte y continuado soporte a las investigaciones en curso, a nivel nacional e internacional, y apoyar programas interdisciplinarios de investigación de largo plazo. El monitoreo del cambio global es por necesidad de largo plazo y requiere de una coordinación sólida. Por ser de largo plazo requiere de recursos que permitan observaciones ininterrumpidas, posiblemente a lo largo de varias décadas. De hecho, la adquisición de conocimiento de la problemática de cambio global a través de la investigación y el monitoreo es costoso, aunque no tan costoso como lo serían las consecuencias de ignorarlo.

El reconocimiento de que es indispensable la participación del público en la discusión de la problemática medio ambiental, tanto local como global, dió lugar a la organización del Primer Seminario sobre Situación y Perspectivas del Sector Eléctrico Mexicano.

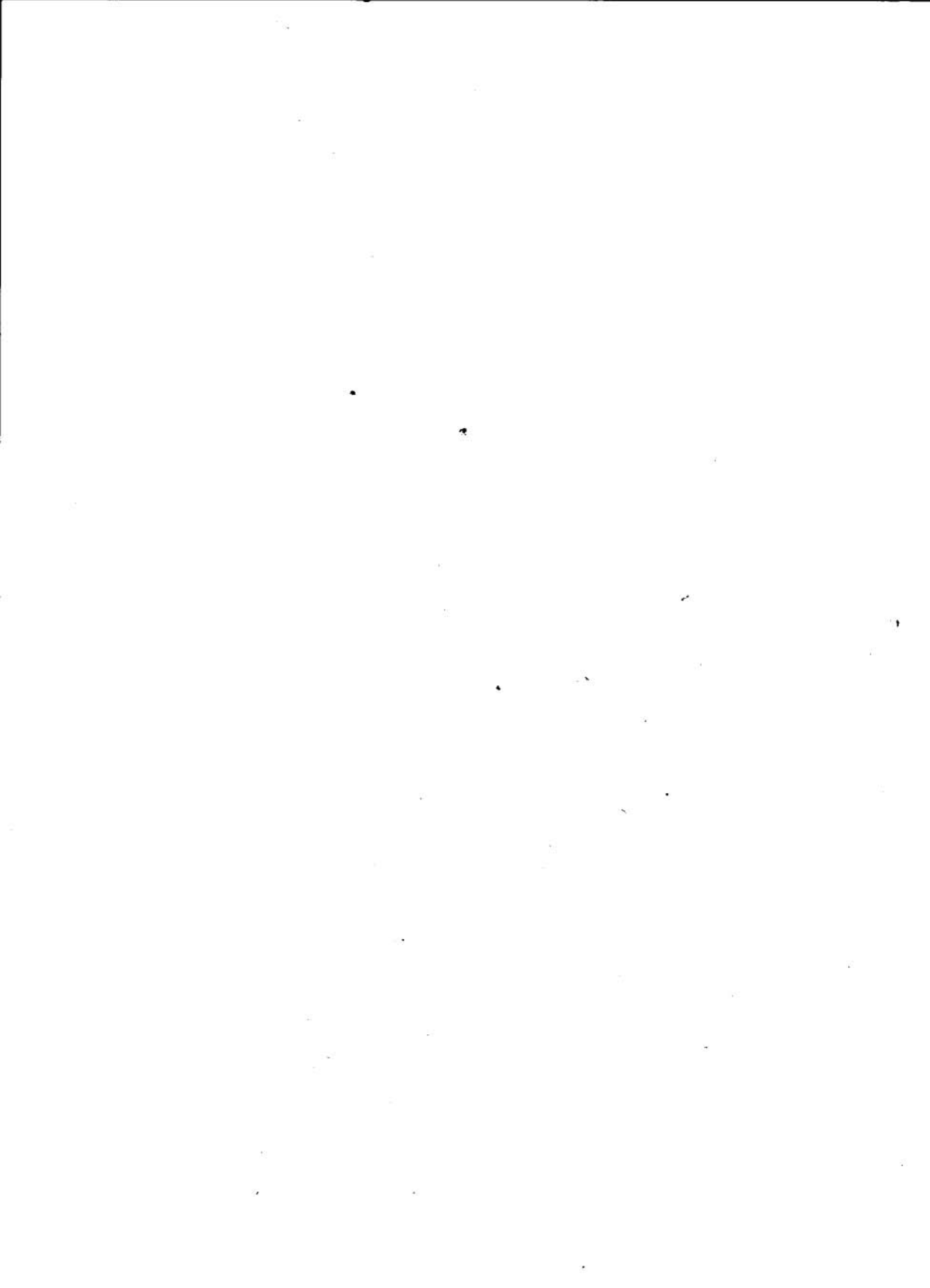
Tomando en cuenta que la problemática del Cambio Global es muy amplia, el seminario, en esta parte, se circunscribió a analizar el Sector Eléctrico en México, sus impactos ambientales y las opciones de prevención, adaptación, mitigación e investigación que un selecto grupo de expertos planteó a través de sus trabajos.

En atención a lo expuesto, ponemos a disposición de los interesados en la problemática ambiental del sector eléctrico mexicano, a través



de la presente publicación, las opiniones, recomendaciones, sugerencias y conclusiones de los expertos que participaron en el seminario mencionado.

Juan Quintanilla Martínez



## **HIDROELECTRICIDAD, USO DEL SUELO Y MANEJO DEL AGUA**

Lourdes Gutiérrez Canet  
Proyectos Geotermoeléctricos, Aplica, S. A.

### **Introducción**

Por su capacidad de instalación, el Sector Eléctrico en México se encuentra dentro de los primeros veinte del mundo. Como todos sabemos, es a partir de la Revolución Industrial cuando se acentuaron e incrementaron los impactos directos e indirectos al medio ambiente. Nuestro país no se ha escapado de ello y hoy presenta un significativo deterioro en los diversos ecosistemas que lo componen, gracias a que la planeación de desarrollo económico realizada en nuestro país, usó y abusó de los recursos naturales en forma acelerada, sin considerar los graves deterioros ambientales que ésta forma de producción ha ocasionado a nuestro patrimonio ambiental.

El desarrollo tecnológico, que permite una mayor producción de bienes y servicios y que aparentemente brinda una "mejor calidad de vida", se contrapone con alteraciones de grandes magnitudes en los diversos ecosistemas donde el hombre ha intervenido, disminuyendo con ello la "calidad de vida".

Estos daños al ambiente, a fin de cuentas, han sido provocados por el hombre, por su antropocentrismo miope. Los Recursos Naturales, bióticos y abióticos, desde siempre se han manejado como elementos segregados de la humanidad, donde el hombre no forma parte de la naturaleza. O bien, cuando se empieza a tomar conciencia de ello, no se conoce el papel que juega el hombre en su ecosistema, en otras ocasiones, lo olvida en el momento en que desarrolla sus actividades. Así pues, el ser humano no tiene conciencia de los efectos que causan sus actividades en el medio ambiente y lo que es peor, en otras ocasiones no quiere saberlo.

Hoy en día, con toda la legislación ambiental que instrumenta y da recursos para hablar de un "desarrollo sustentable", la mayoría de los empresarios en las diversas ramas de la producción, ven a los Estudios de Impacto Ambiental como un trámite, como un mal necesario y como una erogación sin sentido. Sus empresas no contaminan, no dañan al ambiente.

A partir de la aparición de la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, así como sus Reglamentos y Normas, se pretende regular las diversas actividades humanas dentro de un marco que proteja al Medio Ambiente. Con ello, se conjuga el desarrollo tecnológico con el equilibrio ecológico. De esta manera, se pretende administrar al medio ambiente, con la premisa fundamental de alcanzar un "desarrollo sustentable", un aprovechamiento racional que permita alcanzar la "calidad de vida", desde la planeación, construcción y operación de las diversas actividades humanas que impactan al ambiente, a través de criterios ecológicos.

Se tiene la idea generalizada, de que la hidroelectricidad no es contaminante, por lo que no causa daños al ambiente. Sin embargo, aunque en su operación realmente no emite contaminantes, sí podemos decir que durante la etapa de preparación y construcción de cualquier hidroeléctrica, hay daños significativos, permanentes e irreversibles. Lamentablemente, no hay estudios ambientales de seguimiento periódicos, a partir de que una presa se encuentre en operación. Estos estudios nos permitirían conocer realmente los impactos ambientales que las presas hidroeléctricas causan al medio ambiente; sobre todo, en el sector salud, a partir de que se encuentran en operación.

### **Uso del suelo**

Es de fundamental importancia, antes de realizar un proyecto hidroeléctrico, determinar la vocación del lugar geográfico donde se pretende llevar a cabo. Evaluar diversos lugares alternativos, con objeto de elegir el mejor, donde los impactos ambientales sean menores, sin olvidar en ningún momento los criterios ecológicos para su selección definitiva.

De acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en el Art. 17 dice: "En la planeación nacional del desarrollo, será considerada la política ecológica general y el ordenamiento ecológico que se establezcan de conformidad con esta Ley y las demás disposiciones en la materia". Así mismo, el Art. 20 expone que "El ordenamiento ecológico será considerado en la regulación del aprovechamiento de los recursos naturales, de la localización de la actividad productiva secundaria y de los asentamientos humanos, conforme a las siguientes bases:

En cuanto al aprovechamiento de los recursos naturales, el ordenamiento ecológico será considerado en:

- a) La realización de obras públicas que impliquen el aprovechamiento de recursos naturales;
- b) Las autorizaciones relativas al uso del suelo en el ámbito regional para actividades agropecuarias, forestales y primarias en general, que puedan causar desequilibrios ecológicos;
- c) El otorgamiento de asignaciones, concesiones, autorizaciones o permisos para el uso, explotación y aprovechamiento de aguas de propiedad nacional;
- d) El otorgamiento de permisos y autorizaciones de aprovechamiento forestal;
- e) El otorgamiento de concesiones, permisos y autorizaciones para el aprovechamiento de las especies de flora y fauna silvestres y acuáticas; y,
- f) El financiamiento a las actividades agropecuarias, forestales y primarias en general, para inducir su adecuada localización.

En cuanto a la localización de la actividad productiva secundaria y de los servicios, el ordenamiento ecológico será considerado en:

- a) La realización de obras públicas susceptibles de influir en la localización de las actividades productivas;
- b) El financiamiento a las actividades económicas para inducir su adecuada localización, y en su caso, su reubicación;
- c) El otorgamiento de estímulos fiscales orientados a promover la adecuada localización de las actividades productivas; y,
- d) Las autorizaciones para la construcción y operación de plantas o establecimientos industriales, comerciales o de servicios.

Sin embargo, no existen todavía en su totalidad, estudios de Ordenamiento Ecológico para todo el territorio nacional. Esto implica, que el uso de suelo para las Hidroeléctricas, estará fundamentado por el estudio de Impacto Ambiental, básicamente. Y cuando se encuentre en fase de evaluación por la autoridad ambiental del Instituto Nacional de Ecología, ellos solicitarán la opinión de Desarrollo Urbano para determinar la compatibilidad de la obra en el área geográfica en cuestión y dictaminarán sobre el Uso de Suelo de dicho proyecto.

La definición de Uso de Suelo de la Hidroeléctrica deberá ser descrita en la Manifestación de Impacto Ambiental. Es evidente que a Comisión

Federal de Electricidad le interesa crear una presa generadora de electricidad, sin embargo, se puede ampliar el uso de suelo de la presa a otro tipo de aprovechamiento, que permitan generar otras actividades paralelas, compatibles y como apoyo a la economía de los asentamientos humanos que se encuentran dentro del área de influencia de la hidroeléctrica. Es decir, permitir aprovechamientos múltiples del Uso de Suelo, como podrían ser: acuacultura comercial, artesanal o deportiva, creación de un centro turístico en el que se permita la navegación en vela o lanchas sin motor, entre otros.

Esto permitiría resarcir los daños causados a los pobladores afectados por el proyecto hidroeléctrico. Y en caso de que por el llenado del embalse se desaparezcan algunas vías terrestres, esto podría servir como medio de transporte hacia la otra orilla.

Todo ello conlleva, por supuesto, que habrá que realizar tala de árboles para permitir la navegación en dicha presa, antes del llenado de la misma, con objeto de que los medios de transporte no choquen con la copa de los árboles. La tala se puede realizar en todo el vaso o en algunas secciones para permitir la navegación.

En este sentido, hacemos un llamado a la Comisión Federal de Electricidad, con la finalidad de que elaboren, a corto y mediano plazo, estudios enfocados a la posibilidad del aprovechamiento de las presas hidroeléctricas, con objeto de alcanzar el desarrollo sustentable de las mismas, permitiendo con ello incidir en una mejor calidad de vida a la población y no subutilizar el nuevo recurso creado por el área inundada.

## **Manejo del agua**

En relación al comportamiento de la calidad del agua de una hidroeléctrica, sabemos que no es la misma en los afluentes, presa y aguas abajo. Influye en forma determinante la velocidad del agua, la estratificación térmica, la desoxigenación de las capas más profundas en el embalse, el azolve, y por supuesto, la eutroficación.

Toda presa hidroeléctrica debe llevar a cabo un minucioso programa de estudio de calidad del agua antes, durante y después de la construcción del proyecto. Fundamentalmente en la fase de operación. Los estudios fisicoquímicos permiten obtener información de la calidad del agua que se está presentando tanto en los afluentes, presa y aguas abajo de la presa, ya que esto permitirá valorar los cambios de la calidad del agua, para que

nos permitan hacer predicciones a corto o mediano plazo y estar en condiciones de tomar las medidas necesarias correctivas del problema que se presente.

Otro tipo de estudio que se debe realizar para llevar a cabo las acciones del manejo de agua, es llevar a cabo estudios relacionados con la salud humana, principalmente enfocado a estudios epidemiológicos, con objeto de conocer los vectores de las enfermedades que se presenten en la zona por la puesta en marcha de la hidroeléctrica, y con ello llevar a cabo las acciones de prevención y control de las enfermedades transmisibles.

El éxito o fracaso del manejo de la presa hidroeléctrica, estará determinada por su manejo ambiental. Así pues, en el manejo del agua, se deberá evitar lo más posible la sedimentación y contaminación tanto del embalse como de aguas abajo.

El manejo del agua, deberá así mismo, controlar las plantas acuáticas que se convierten en plaga y que en un momento dado pueden impedir el óptimo funcionamiento de la presa hidroeléctrica.

De acuerdo con Dale W. Jenkins y Rexford D. Lord en su artículo de colaboración "Evaluación Ecológica y manejo ambiental" del libro *Las Represas y sus efectos sobre la Salud*, editado por El Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la Salud, mencionan que:

"Los estándares de calidad del agua de una presa y su control dependen del uso que se vaya a dar al agua. Si se piensa abastecer de agua potable a personas y animales es necesario evitar la contaminación química y de aguas negras y la turbidez. Sin embargo, si el agua se va a utilizar para la irrigación o la industria, los estándares de calidad pueden ser algo más bajos. Para la producción de hidroelectricidad se puede usar casi cualquier clase de agua, excepto la que tenga un elevado nivel de acidez, que podría corroer las turbinas.

"Por lo tanto, es necesario decidir por adelantado el uso del agua, fijar los estándares de calidad adecuados y evaluar las fuentes que aportan agua y contaminación, tras lo cual se pueden decidir los estándares de calidad y tomar medidas para evitar la contaminación con métodos como la instalación de albañal, estanques de sedimentación para las ciudades, y tratamiento del agua, recuperación de contaminantes u otras medidas industriales.

"...El procedimiento para determinar los estándares de calidad de una presa son los siguientes:

- Definir los usos de la presa para fijar los estándares necesarios, por ejemplo, para agua potable, irrigación, acuacultura, electricidad, recreo;
- Evaluar la calidad del agua que entra en la presa, la tasa de flujo y el tiempo de permanencia en el embalse;
- Evaluar la contaminación presente y potencial del embalse, debido al drenaje, la industria, los compuestos químicos agrícolas, la vegetación podrida o la salinización. Determinar los grados de prevención o control posibles;
- Fijar estándares de calidad basados en: a) uso del agua; b) parámetros críticos; c) documentos sobre criterios; d) evaluación del riesgo; e) aspectos económico, legal y práctico; y,
- Laborar programas de vigilancia práctica para los parámetros críticos que incluyan procedimientos de muestreo y medida, equipo y frecuencia de la vigilancia. Resaltar los parámetros de importancia directa para la salud, respecto a los cuales se pueden tomar medidas que cambien los valores de las fuentes críticas de mala calidad del agua".

El manejo de la presa, debe hacerse de forma holística, contemplando a éste nuevo ecosistema como un sistema integral, en donde se tienen entradas y salidas de energía y en medio una caja negra.

Es preciso cuantificar y calificar los diversos impactos ambientales que se están dando en la fase de operación, para poder tomar decisiones que corrijan o mitiguen estos impactos. Es por demás decir, que de un buen manejo ecológico, dependerá la vida útil de la presa hidroeléctrica, sobre todo, en relación a su problema principal, que es la tasa de sedimentación.

Es importante destacar que entre los principales factores que inciden con mayor frecuencia respecto a la sedimentación de la presa, se encuentra la erosión de las orillas del embalse ocasionado por las constantes mareas que se presentan, los derrumbes y la depositación de plantas acuáticas flotantes que cuando mueren se precipitan al fondo del espejo de agua, así como la desintegración, al paso del tiempo, de toda la flora que quedó sumergida durante el llenado del embalse.

## **Conclusiones**

- El mantener e impulsar el desarrollo de la fuente energética que



representan las hidroeléctricas, deberá ser una prioridad nacional y en una visión planetaria, una fuente alternativa de energía, fundamentalmente en aquellos países que cuentan con ríos caudalosos;

- El impulsar las hidroeléctricas simbolizará el manejo coherente de las cuencas hidrológicas, su recarga y la distribución del recurso de manera racional y sostenida;
- Las políticas de manejo y monitoreo de las presas y complejos hidrológicos deberá ser fortalecido en función de reconvertir el recurso en fuente de bienestar y fortalecimiento social, buscando fuentes alternativas de desarrollo;
- Comprender que el manejo de un complejo hidrológico no es sólo cuestión de ingeniería sino un intrincado y complejo sistema ambiental, podría encausar y reorientar las políticas de operación de las hidroeléctricas;
- La generación de energía eléctrica a partir del movimiento del agua, se puede considerar esto como un recurso renovable, en este sentido, es inconcebible una presa azolvada, erosionada o sin capacidad de recarga;
- Fomentar la conciencia de las implicaciones ambientales significa optar por una línea decidida de capacitación en materia ambiental, con múltiples líneas de proyección como: manejo de cuencas Hidrológicas, ordenamiento ecológico, monitoreos fisicoquímicos e impacto y riesgo ambiental entre otros;
- La visión de impulsar tecnologías limpias, de bajo impacto, y de capacidad para mantener una producción por largos periodos, se perfila como una alternativa de la humanidad;
- Si bien Comisión Federal de Electricidad, ha manejado muy buenos estudios de impacto ambiental, aún siendo una empresa paraestatal, el seguimiento que el Instituto Nacional de Ecología realiza a partir de su normativa, no proporciona una alternativa de utilización holística del sistema;
- Aunque se cumplan con los requerimientos de la autoridad ambiental, la C.F.E. no ha tomado una iniciativa para aplicar la valiosa información con la que cuenta, para mejorar las condiciones de vida del entorno, la vida útil de sus instalaciones y la consecuencia ambiental de la humanidad; y,
- Es fundamental contemplar e impulsar políticas tendientes al manejo sustentable de las cuencas hidrológicas para asegurar la recarga y

en consecuencia la operación de los complejos hidráulicos.

El reto es grande, los recursos económicos pocos y dosificados, la problemática social y ambiental es exponencial, es fundamental tomar partido y actuar de manera consciente, planeada, consecuente y prioritaria.

# **LA GENERACION ELECTRICA EN MEXICO Y SUS IMPACTOS AMBIENTALES: PASADO, PRESENTE Y FUTURO**

Juan Quintanilla Martínez  
Programa Universitario de Energía, UNAM

## **Introducción**

Tradicionalmente en México, el consumo de electricidad ha crecido más rápidamente que el consumo total de energía. Así, durante el período 1965-1975 la tasa anual promedio de crecimiento del consumo eléctrico fue de 10.76 por ciento, en el período 1975-1985 fue de 7.64 por ciento y en el 1985-1995 de 5.25. En cambio, la tasa anual promedio de crecimiento del consumo total de energía fue de 6.58, 5.83 y 1.33 por ciento en los períodos mencionados. En 1965 la energía eléctrica representaba el 3.5 por ciento del consumo en términos de fuentes primarias y ahora, en 1995, representa el 8.8 por ciento. Si bien esto indica un mayor grado de uso de la electricidad en las diferentes actividades en el país, también indica que el uso de ella está muy lejos del nivel en que participa en los países desarrollados<sup>α</sup>.

Por otra parte, la tasa promedio anual de crecimiento del PIB, en la década 1985-1995, correspondió a 1.66 por ciento en tanto que la tasa promedio anual de crecimiento del consumo energético correspondió a un valor de 1.33 por ciento para el mismo período y la de consumo eléctrico a 5.25 por ciento. Si no se toma en cuenta la caída del PIB en 1995, debido a la crisis de finales de 1994, las tasas de crecimiento del PIB, del consumo energético total y del consumo de electricidad se ubican en los valores de 2.57, 1.72 y 5.44 por ciento, respectivamente, observándose una tendencia a desacoplamiento entre el crecimiento del PIB y la energía total antes de la crisis mencionada, no así en el caso del PIB y la energía eléctrica, ya que en este caso la relación parece mantenerse casi estable.

Si bien es de esperarse que la electricidad continúe ganando importancia en su participación en la estructura energética del país, también es

<sup>α</sup> En 1985 la electricidad representaba el 27 por ciento del consumo en términos de fuentes primarias de energía para los países de la OCDE y en 1995 representa más del 30 por ciento.

de esperarse que su generación, a partir de las fuentes primarias que se emplean, de lugar a problemas ambientales, independientemente de que su uso final sea más limpio, eficiente y versátil en comparación con el uso directo de los combustibles fósiles. Por otra parte, hay que tomar en cuenta que la electricidad contribuye a la diversificación energética, con reducción en el consumo de combustibles fósiles, mediante la incorporación de otras fuentes de generación eléctrica, tal es el caso de la participación de la geotermia, la nuclear, las fuentes renovables, etcétera. Sin embargo, debemos reconocer que el debate ambiental, en cuanto a la generación de electricidad, se enfoca principalmente a las fuentes fósiles empleadas en la producción de ella.

En México, los principales usuarios de la electricidad son, en orden de importancia, el Industrial, el Energético, el Residencial, el Comercial, el Agropecuario y el Público. En los sectores Residencial y Comercial el uso es principalmente para iluminación y operación de aparatos domésticos. Los aspectos de aire acondicionado y calefacción tienen impacto, principalmente el primero de ellos en zonas costeras, norte del país y las penínsulas de Baja California y Yucatán.

Las tendencias futuras para la generación de electricidad en México incluyen un posible incremento en la generación a base de carbón (principalmente carbón importado), un fuerte incremento en ciclo combinado (a base de gas, tanto en la capacidad instalada como en la comprometida y adicional resultado de la política de sustitución de combustóleo por gas natural y de consideraciones ambientales), un incremento muy reducido de combustóleo y geotermia, ningún incremento en nuclear, incremento pequeño en turbogas y combustión interna y un incremento marginal de eólica. En el caso de la energía nuclear, su expansión en la generación no es fácil de proyectar, debido a razones políticas, económicas, ambientales y de seguridad. Sin embargo, desde el punto de vista de la problemática de gases de invernadero que trataremos aquí ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$  y partículas; también incluiré las emisiones de  $\text{SO}_x$ , debido a la importancia de éstas en el caso específico de México, aún cuando no constituyan parte de los gases de invernadero) es importante reconocer que la generación eléctrica por medios nucleares no contribuye a las emisiones.

En cuanto a las fuentes renovables de energía, podemos decir que la contribución proveniente de grandes centrales hidroeléctricas no se verá incrementada en un futuro cercano y en todo caso se esperaría una contribución proveniente de micro hidroeléctricas; la geotermia se incrementará,

pero como ya indicamos con crecimientos relativamente pequeños; en cuanto a la eólica el aumento será sustancial en relación a la capacidad existente, sin embargo su contribución todavía continuará siendo marginal; por último, la solar en su vertiente fotovoltaica jugará un papel a una escala muy modesta, sin embargo, quizás ésta sea la más promisoría de las fuentes renovables en base a una contribución solar fotovoltaica descentralizada en vista de la tendencia a menores costos de conversión de energía por medio de esta tecnología.

De lo anterior se desprende que el país continuará dependiendo fuertemente de los combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades futuras de energía eléctrica y con ello incrementos en las emisiones de gases de invernadero.

El propósito del presente trabajo es analizar la evolución histórica, pasada y presente, de la capacidad instalada y de la generación eléctrica, así como el consumo de combustibles y las emisiones de gases de invernadero asociadas. Por otra parte, analizar bajo la técnica de escenarios económicos y poblacionales a futuro (en el corto y mediano plazos) las posibles necesidades de capacidad instalada, generación, mezcla y consumo de combustibles y emisiones de gases de invernadero asociadas. A continuación se comenta sobre las implicaciones energéticas de las políticas de sustitución de combustibles y estándares ambientales. Finalmente, se establecen una serie de comentarios sobre las posibles direcciones tecnológicas para el sector, desde el punto de vista de la eficiencia de generación y sus efectos en la reducción de las emisiones.

### **Aspectos ambientales relacionados a la generación eléctrica**

Ninguna fuente de generación eléctrica está libre de producir impactos ambientales. El empleo de grandes centrales de generación resulta en la concentración de las emisiones en el lugar de la planta dando lugar a que las tecnologías de control puedan ser más fácilmente empleadas así como el monitoreo de los contaminantes. Grandes fuentes de emisión sin un adecuado control de emisiones resultan indeseables, sin embargo, plantas pequeñas no son la solución a estos problemas ambientales, ya que el control de ellas puede resultar poco práctico y antieconómico, aunque con la presencia de la cogeneración de calor y electricidad, la economía del control de las emisiones puede resultar más favorable.

Las preocupaciones ambientales poseen dimensiones técnicas, eco-

nómicas y políticas. Los aspectos técnicos incluyen la cantidad y tipo de contaminante liberado al ambiente, sus caminos e impactos, y la factibilidad y el desempeño de las tecnologías para el control de las emisiones. Los avances científicos y tecnológicos de la última década han sido impresionantes, como lo muestra la disponibilidad comercial de opciones de control y el importante esfuerzo de desarrollo que se realiza en nuevas tecnologías. Se puede decir que también ha recibido considerable atención la factibilidad económica de las soluciones tecnológicas a los problemas ambientales.

Esto es correcto para todas las tecnologías, sin embargo en años recientes la atención se ha centrado en el carbón como lo demuestran los reportes publicados por la OCDE, los cuales se concentran en las consideraciones ambientales del carbón y los aspectos económicos de las diversas tecnologías de control de las emisiones provenientes del ciclo de combustible del carbón. Los estudios concluyen que se pueden alcanzar niveles importantes de protección ambiental con la tecnología existente, especialmente para las nuevas plantas, conservando las ventajas económicas de la generación eléctrica a base de este combustible bajo las condiciones actuales del mercado. Este es un aspecto que habrá de ser analizado con el mayor de los cuidados para el caso de México, tomando en cuenta las propiedades de los carbones nacionales, el nivel del recurso y los precios y disponibilidad del carbón en el mercado internacional, estos aspectos entre otros muchos deberán ser considerados en el análisis mencionado.

Los aspectos políticos asociados con la generación eléctrica no son, desde luego, independientes de los aspectos técnicos y económicos. La investigación científica sobre los efectos ambientales, los desarrollos de la ingeniería con respecto a las tecnologías y el análisis económico de los beneficios y costos afectan la naturaleza del debate político de la energía. Sin embargo, las diferencias de opinión están presentes y muchas de ellas se centran en los aspectos científicos y económicos de la protección ambiental y, por consecuencia, en los niveles adecuados de control.

Entre los diversos países, estas diferencias se manifiestan en las diferentes políticas sobre los niveles de control y las estrategias para su implementación. Es por ello que el debate político deberá ser apoyado con importantes mejoras en la calidad y difusión de la información referente a los aspectos científicos, técnicos y económicos de control de los impactos ambientales.

En buena medida, el propósito del presente trabajo es el de contribuir

a este debate por medio de una evaluación preliminar de algunos de los impactos ambientales de las principales fuentes primarias de energía empleadas en la generación eléctrica.

Sin pretender ser exhaustivo, podría decirse que las más importantes emisiones que contribuyen a estos impactos y sus fuentes de energía asociadas son las siguientes:

- Oxidos de azufre y nitrógeno provenientes de la combustión de combustibles fósiles;
- Fluoruros y cloruros provenientes de la combustión de combustibles fósiles;
- Compuestos orgánicos provenientes de la refinación de petróleo, de la combustión de carbón y de derivados del petróleo (combustóleo, diesel, gas natural, etcétera);
- Residuos de elementos provenientes de la combustión de carbón, combustóleo, etcétera;
- Partículas provenientes del minado, preparación y combustión del carbón y de la combustión de combustibles derivados del petróleo;
- Desechos sólidos resultantes del minado y combustión del carbón y de la generación de energía eléctrica por medios nucleares;
- Materiales radioactivos provenientes del ciclo de combustible nuclear y de la combustión del carbón; y,
- Descargas térmicas provenientes de la generación eléctrica por medio de combustibles fósiles y nucleares.

Un análisis completo de los impactos ambientales de cualquier combustible primario para la generación eléctrica necesariamente deberá incorporar el ciclo completo del combustible bajo consideración, esto es, deberá incluir su exploración, minado o extracción, preparación o transformación, transportación, almacenamiento y combustión o conversión en otros combustibles.

Así, por ejemplo, en el caso del carbón, los recursos de carbón a nivel mundial son abundantes y bastante distribuidos geográficamente. En la ausencia de controles adecuados, la extracción y uso del carbón puede tener profundos efectos sobre el medio ambiente. El ciclo del carbón consiste de su minado, preparación, transportación, almacenamiento y combustión o conversión en otro tipo de combustibles. Generalmente, los impactos ambientales provenientes de la producción de carbón son de carácter local,



no así aquellos provenientes de la combustión del mismo, ya que éstos pueden tener implicaciones nacionales e incluso internacionales. En consecuencia, las medidas para resolver el problema requieren tomar en cuenta la amplia gama de estas implicaciones.

Gran parte del esfuerzo que se está haciendo a nivel mundial se ubica en crear las bases para una expansión autosustentable de la producción y uso de esta fuente energética. Parte importante de este proceso se localiza en reducir algunas de las incertidumbres asociadas con el carbón, específicamente se busca la identificación y evaluación, en lo posible, de los factores que a menudo se identifican como constricciones o barreras para el desarrollo de esta fuente energética.

La protección ambiental es uno de los factores que contribuye a la incertidumbre en el uso a futuro del carbón. Otros factores incluyen: disponibilidad de infraestructura; seguridad del suministro; curso futuro de la demanda eléctrica; alcance, nivel y exigencia de los estándares ambientales nacionales y la contribución futura de otras fuentes, como es el caso de la energía nuclear.

Claramente, el análisis de los impactos ambientales de los combustibles bajo la metodología de ciclo del combustible cae fuera del alcance del presente trabajo, por lo que sólo nos concentraremos en los aspectos resultantes de la combustión para la generación eléctrica. Por lo anterior, me limitaré a comentar sobre los impactos ambientales asociados con el empleo de las diferentes fuentes de energía primaria para la generación eléctrica.

Como comentamos en párrafos anteriores no existe planta de generación de potencia sin impactos ambientales, ya sean éstos directos o indirectos. El uso de recursos naturales tales como tierra y agua, contaminación de aire y agua constituyen impactos directos. Otros, tales como consideraciones estéticas, sociales y modificación del habitat constituyen impactos indirectos y no pueden ser fácilmente evaluados y comparados. Las evaluaciones existentes del uso de estos recursos naturales son, por lo general, aplicables a la o las plantas específicas y por ello comparaciones de tipo genérico son de utilidad limitada.

### **Impactos ambientales originados por el uso de combustibles fósiles**

La generación eléctrica es la etapa del ciclo de combustible para la cual contamos con información disponible. La Tabla 1 lista los principales



problemas ambientales asociados con la generación en plantas térmicas que consumen combustibles fósiles.

En el aspecto del uso de recursos correspondientes a tierra y agua se considera que las plantas de generación eléctrica son o constituyen usuarios mayores de estos recursos. De hecho su emplazamiento, a menudo, está constricto por su impacto sobre o por la disponibilidad de estos recursos.

**Tabla 1**

**Problemas ambientales asociados con  
la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles**

- Uso de tierra y agua
- Emisiones a la atmósfera ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ , HC, trazas de elementos, partículas, radionuclidos, etcétera)<sup>a</sup>
- Transporte a larga distancia y deposición de contaminantes atmosféricos<sup>b</sup>
- Descargas térmicas
- Impactos climáticos locales y visuales por uso de torres de enfriamiento
- Disposición de desechos sólidos (fuentes con controles de particulado y/o  $\text{SO}_x$ )
- Disposición de cenizas (para el caso del carbón)
- Otros (ruidos, etcétera)

<sup>a</sup> Las emisiones de contaminantes a la atmósfera provenientes del empleo de gas natural para la generación eléctrica son menores para el caso de los óxidos de azufre, dióxido de carbono, HC y partículas, no así para los óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono.

<sup>b</sup> En caso de que no existan opciones para su utilización.

En cuanto al uso de tierra, los tamaños de terreno para emplazamientos de plantas actuales, aún para aquellas de un tipo dado de combustible, varían en un intervalo considerablemente grande y dependen de factores tales como: las especificaciones individuales de la central; costo del terreno, el cual puede afectar el diseño, si hay desechos sólidos, la disposición de ellos dentro o fuera del área de la central; localización de la central y capacidad instalada.

No existe una sólida relación entre tamaño del emplazamiento y especificaciones de la central (tales como la capacidad instalada), sin embargo el tamaño del emplazamiento dependerá del tipo de combustible a emplear en la generación. Por ello porciones del terreno dedicado a la central permanecen sin perturbación o cambio alguno o son usados para las facili-

dades de servicios que requiere la central, por lo que una extrapolación lineal de las necesidades según la capacidad instalada no es adecuada. Por ejemplo, para plantas de carbón se requiere de terreno para la disposición de cenizas y de desechos de la desulfurización de gases de chimenea. No es tal el caso de las plantas alimentadas con derivados del petróleo y gas, ya que no requieren de la disposición de cenizas y por tanto esto se refleja en requerimientos de terreno menores.

Por lo que respecta al recurso agua, el uso de ella en las plantas de generación ocurre de manera primordial en las torres de enfriamiento, como pérdidas evaporativas, aunque se presentan usos adicionales de este recurso con los equipos de control de los contaminantes, como es el caso de precipitadores electrostáticos, y el tratamiento de gases de chimenea de la central. Desde luego, en caso de que la central esté ubicada en una región con recursos acuíferos pobres, será necesario instalar o prever elementos para el reciclado de cantidades importantes de agua y con ello impactar el tamaño del terreno y, posiblemente, el diseño de la central.

En cuanto a las emisiones de contaminantes a la atmósfera provenientes de la combustión de combustibles fósiles en las plantas de generación eléctrica se tienen los óxidos de azufre y nitrógeno, las partículas, trazas de metales y dióxido de carbono. También se tiene, aunque en menor cantidad, liberaciones de cloruros, fluoruros, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados. Se tiene pequeñas cantidades de materiales radioactivos tales como radón y uranio presentes en los combustibles fósiles empleados en las centrales eléctricas. Es claro que las emisiones de la combustión de combustibles fósiles en plantas de generación se clasifican por especies químicas, esto es, óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ); óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ); hidrocarburos no quemados (HC); cloruros; fluoruros; monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), excepto por las partículas en las que muchas de las especies químicas están presentes (por ejemplo, trazas de metales, etcétera). Finalmente, las descargas térmicas corresponden a las pérdidas de calor en la planta.

La importancia de los impactos en la salud humana y en el medio ambiente (ya sean locales o remotos) proveniente de las emisiones de óxidos de azufre, hacen que este contaminante sea un blanco primario de las políticas ambientales en la mayoría de los países. Los principales emisores de óxidos de azufre son las plantas de generación a base de carbón y de derivados del petróleo (combustóleo, diesel, etc.). Sin embargo, el exceso de concentración de este contaminante, a nivel de la superficie de la tierra es,

a menudo, causado por la industria local y el transporte debido a que las emisiones de  $\text{SO}_2$  no son controladas o no son dispersadas adecuadamente por las chimeneas. Por otra parte, es de esperarse que la tasa de emisión dependa del contenido de azufre en el combustible y del tipo de planta. Es claro que el control de las emisiones de óxidos de azufre puede ser efectuado en cualquiera de las diferentes etapas asociadas con el uso del combustible particular, esto es, se pueden efectuar antes, durante o después de la combustión. La etapa que se seleccione, antes, durante o después de la combustión, dependerá de la tecnología disponible, de los costos en que se incurra y de los beneficios para el medio ambiente, la sociedad y la economía de la instalación y con ello para el país.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno, por si solas o junto con otros contaminantes, pueden contribuir a impactos sobre la salud humana y el medio ambiente -a escala local, regional o internacional. Se sabe que los óxidos de nitrógeno se forman cuando el oxígeno y nitrógeno presente en el combustible y en el aire de combustión son expuestos a las altas temperaturas características de los procesos de combustión. El principal compuesto es el óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) cuya concentración total es debida a la suma del nitrógeno presente en el aire (este se asocia con el 75 por ciento de las emisiones totales de  $\text{NO}$ ) y el nitrógeno químicamente ligado en el combustible. En tanto que los  $\text{NO}_x$  son formados durante la combustión, los posibles procesos o técnicas y tecnologías de control habrán de enfocarse y se enfocan primordialmente a la modificación de las técnicas de combustión.

En cuanto a las emisiones de partículas, éstas se originan principalmente en las plantas generadoras a base de carbón y, si éstas, no poseen controles para las emisiones de partículas los volúmenes de emisiones serán considerablemente mayores que las provenientes de plantas a base de derivados del petróleo y de gas.

Por lo que respecta a los contaminantes correspondientes a trazas de metales los posibles impactos han venido adquiriendo mayor atención por parte de los países en general. Sabemos que todos los combustibles fósiles contienen trazas de metales en cantidades variables, cantidades que dependen del combustible y de su origen. Por otra parte, las cantidades de estos metales que son liberadas a la atmósfera por las plantas de generación eléctrica dependen de la concentración del elemento en el combustible, del tipo de caldera empleada y de la naturaleza de los dispositivos para el control de las emisiones en los gases de chimenea.

La combustión de todos los combustibles fósiles genera dióxido de

carbón, sin embargo, en base al contenido energético del combustible, la combustión del carbón libera 25 por ciento más  $\text{CO}_2$  que el petróleo y cerca del 50 por ciento más  $\text{CO}_2$  que el gas natural. Las técnicas para prevenir o controlar la liberación de  $\text{CO}_2$  a partir de la combustión de los combustibles fósiles son extremadamente costosas en materiales y energía y al presente no parecen resultar económicamente justificables.

Por lo que respecta a las descargas térmicas de las plantas de generación a los cuerpos de agua puede afectar los ecosistemas acuáticos. Los principales efectos de estas descargas térmicas consisten en pérdidas por evaporación que son tomadas de los cuerpos de agua y por otra parte los efectos de sombreado de la pluma. Un efecto adicional se tiene en posibles cambios climáticos regionales por descargas térmicas a la atmósfera, sin embargo será necesario evaluar a partir de qué valor de la descarga térmica se pueden presentar tales impactos.

Finalmente, los desechos sólidos provenientes de las plantas de generación alimentadas con combustibles fósiles se originan a partir del combustible mismo y de la remoción de los residuos de un medio (el aire) a otro medio (la tierra) por medio de los dispositivos de control del azufre y partículas. En el caso del gas natural, éste es limpiado, por lo general, en las etapas de producción del mismo y las plantas de generación a base de este combustible suelen emitir cantidades mucho menores de azufre y partículas, por lo que, usualmente, éstas no requieren controlar estas pequeñas cantidades de desechos sólidos.

En un sentido muy amplio, la misma situación se presentaría en el caso de plantas de generación a base de derivados del petróleo, a menos que el contenido de azufre así lo requiera. De hecho, las preocupaciones relativas a desechos sólidos en plantas de generación a base de combustibles fósiles se centra en las que funcionan a base de carbón. La magnitud de las cantidades de desechos sólidos involucradas se incrementarían con un aumento en el uso de carbón. La disposición de grandes cantidades de desperdicios sólidos, a menudo, crea problemas de espacio, los cuales pueden verse agravados si ocurre que los residuos, provenientes de la combustión de los combustibles fósiles, son clasificados como residuos peligrosos. Sin embargo, algunos de estos residuos sólidos pueden tener aplicaciones en el desarrollo de carreteras y en la construcción. Cualquiera que sea la situación, es de esperarse que la cantidad de residuos sólidos que se produzcan dependerá, en alto grado, de la naturaleza del combustible y podrá variar ampliamente entre los diferentes combustibles sólidos.

## **Impactos ambientales originados por el uso de energías renovables**

Podemos considerar que las fuentes renovables de energía son de dos tipos, el primero consiste de flujos naturales de energía más o menos continuos (tal es el caso de la luz del sol, viento, olas, etcétera) y el segundo consiste de existencias naturales de energía que pueden ser renovadas lo suficientemente rápido para uso humano (tal es el caso de la biomasa, reservorios hidroeléctricos, etcétera). Estas fuentes de energía son altamente heterogéneas y resulta difícil romperlas en los pasos necesarios o convenientes para poder hablar de un ciclo de combustible como el de los combustibles fósiles para identificar los residuos al ambiente y los impactos asociados con cada paso.

Independientemente de la impresión generalmente favorable que se tiene con respecto a ellas, las fuentes de energía renovables no están libres de potenciales impactos ambientales. Debido a que ellas son formas mucho más diluidas de energía, comparadas con los combustibles fósiles o la energía nuclear, las fuentes renovables de energía a menudo requieren de grandes estructuras para producir una cantidad de energía comparable, lo que a su vez implica altos requerimientos de materiales y de uso de terreno. Por otra parte, es importante y razonable recordar que desarrollos a gran escala de fuentes renovables pueden tener impactos climatológicos y ecológicos importantes como resultado de la desviación de un flujo natural de energía o por el intenso uso de las existencias naturales de energía. Por otro lado, tienen efectos positivos al evitar los efectos ambientales adversos asociados con los tipos de generación eléctrica que desplacen o eliminan.

A continuación, analizaré, brevemente, los residuos al medio ambiente y los impactos más específicos asociados con las formas más comunes de las energías renovables, esto es, la biomasa, solar, geotérmica, hidroeléctrica y viento. Es conveniente hacer notar que estas formas, la solar y el viento, pueden ser usadas en aplicaciones a pequeña escala para generar electricidad, así como a gran escala en instalaciones de tipo centralizado. Finalmente, las implicaciones ambientales por usos pequeños de estas fuentes no sólo son diferentes en escala sino que también pueden diferir en su naturaleza.

### **• Biomasa**

El término biomasa incluye desechos sólidos municipales, desechos

de productos de la madera y de la industria alimentaria, residuos de la explotación maderera y de plantaciones de energía (esto es, árboles, plantas o biomasa acuática que se hace crecer para específicamente transformarla en energía).

Algunas de las formas de generación eléctrica por medio de biomasa tienen impactos positivos en el medio ambiente, por ejemplo, la conversión de residuos municipales e industriales ayuda en la solución de los problemas de disposición final de los desechos. De manera similar, la recolección de residuos provenientes de las actividades madereras disminuye el riesgo de incendios forestales y facilita la rápida reforestación.

El establecimiento de plantaciones energéticas a gran escala puede competir por la disponibilidad de tierra para la producción de alimentos y maderera y causa serias perturbaciones en los ecosistemas aún cuando se realice una gestión cuidadosa de la zona. Bajo esta óptica, si la biomasa ha de proporcionar una cantidad apreciable o más apreciable de la energía usada por el país, se requerirían millones de hectáreas de tierra para ello.

Tal cambio o mutación en la agricultura no ha sido experimentado ni registrado a través de la historia y no es claro qué daño se produce en los suelos, si este es permante o no y, de ser así, en qué medida, por las plantaciones energéticas intensivas. Podría decirse que la mayor barrera a las plantaciones energéticas proviene de la afectación de tierra para usos agrícolas, fundamental para la producción de alimentos, ya que este uso representa, a mi juicio, el mayor valor agregado de la tierra con esta orientación primordial.

La mayor parte de las formas secas de la biomasa pueden ser quemadas para producir calor y electricidad. Tal combustión produce bajos niveles de emisiones de óxidos de azufre comparadas con las de la combustión de combustibles fósiles, pero dan lugar a altos niveles de emisiones de partículas y gases orgánicos. Sin embargo, estas emisiones se reducen considerablemente si se tiene una combustión completa, tal es el caso de instalaciones medianas y grandes que hacen uso de estos combustibles. De la experiencia reportada en la literatura general se deduce que los principales problemas asociados con las emisiones ocurren a consecuencia de la combustión incompleta en pequeñas instalaciones. El tratamiento para secado y manejo de la biomasa presenta diversos riesgos de salud a los trabajadores, en especial esto puede ocurrir con el manejo de desechos municipales donde se puede tener presentes bacterias patógenas y compuestos químicos tóxicos.



Como sabemos, la biomasa puede ser convertida en combustibles líquidos y gaseosos por medio de procesos de conversión biológica y termoquímica. La conversión biológica produce metano y etanol y la termoquímica aceites y gas de síntesis. El gas de síntesis puede ser sujeto de una mejora incremental pasándolo a metano o metanol. Estas tecnologías de conversión dan lugar a varios niveles de efluentes (al aire o en forma líquida) y algunos de ellos requieren de grandes cantidades de agua.

Es probable que la futura producción de electricidad a partir de la biomasa, si se da, sea a base de unidades a pequeña escala y por ello será necesario disponer de información adecuada de los impactos ambientales de tales unidades. En el futuro a corto plazo, el uso más favorable, desde el punto de vista económico y ambiental, de la biomasa para la generación de electricidad es aquella que combina la producción de energía con la remoción de desechos, en cuyo caso existe un balance entre los impactos ambientales positivos y negativos.

#### • **Energía solar**

A menudo se considera que las grandes extensiones de tierra que se requieren para el emplazamiento de grandes plantas solares centralizadas próximas a los sitios de uso final, en su versión térmica y/o fotovoltaica, constituye la mayor desventaja para esta fuente de energía. En general los residuos al aire y agua, sólidos resultantes del uso de la energía solar son despreciables, sin embargo accidentes, emergencias o la limpieza periódica de unidades térmicas solares pueden liberar contaminantes dependiendo de los fluidos empleados.

Se estima que los desechos de calor de plantas térmicas solares son mucho menos significativos que los de los combustibles fósiles o de plantas nucleares. Por ejemplo, un campo de heliostatos de una planta térmica solar puede producir cambios locales en el balance energético, cambios en los patrones de los vientos y de las temperaturas aire-superficie. Sin embargo, el impacto de tales cambios sobre el microclima dentro y en los alrededores de la planta deberán ser estudiados en detalle.

Existen reportes que indican afectaciones a la ecología local, en especial si la planta se ubica en áreas desérticas. Asimismo, se reportan algunos riesgos para las personas debido a posible exposición accidental de la retina humana a intensidades solares varias veces la del sol por más de unos cuantos segundos.



En el caso de plantas de generación por medios fotovoltaicos no existen, por lo general, descargas contaminantes al aire, existe, sin embargo, la posibilidad de descargas de alto voltaje que originen ozono y humos de la combustión o quemado de plásticos. Por otra parte, si en la limpieza de los arreglos fotovoltaicos se emplean detergentes se presenta una demanda de oxígeno en el agua, si se requieren herbicidas también se presenta una demanda de oxígeno. Finalmente, no se espera generación de desechos sólidos, sin embargo, al decomisionar la planta se esperaría contribución de desechos sólidos, tales como: concreto, silicio, barnices y vidrio que tendrían que ser apropiadamente dispuestos. Dependiendo de la eficiencia y economía de los procesos de recuperación, se podría reciclar el silicio de las celdas fotovoltaicas.

Quizás el desarrollo futuro más probable de la generación eléctrica por medios solares se ubique en las aplicaciones a pequeña escala a través de la disposición de dispositivos fotovoltaicos más eficientes y menos costosos. Los efectos ambientales de su uso son, principalmente, de carácter positivo en el sentido de que podrían reemplazar la electricidad generada por otros medios, tal vez más contaminantes. Sin embargo, es conveniente reconocer que, desde el punto de vista de ciclos de combustibles y ciclos secundarios de materiales, los impactos ambientales indirectos son más importantes y son de carácter tóxico, tal vez más que para otras fuentes. Estos impactos indirectos se ubican en los ciclos secundarios de la producción de materiales y componentes, de su instalación y su disposición final al término de su vida útil.

#### • *Geotermia*

La energía geotérmica puede tener efectos ambientales adversos sobre aire, agua y tierra. Los efectos específicos dependerán del sitio específico y podrán variar de acuerdo con las propiedades del reservorio y del diseño de la planta de generación eléctrica.

Los contaminantes del aire son emitidos a través de la liberación del vapor geotérmico y de la liberación de gases no condensables. Como ya se mencionó, el tipo y cantidad de contaminantes liberados son específicos del emplazamiento y desde luego dependerán de la composición química del fluido geotérmico. En el caso de Cerro Prieto en el Estado de Baja California en México, los principales efluentes al aire son  $H_2S$ ,  $NH_3$  y  $CO_2$ . Se considera que el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es el efluente de mayor preo-

cupación ya que es altamente tóxico. De acuerdo a la literatura general, se considera que sus efectos directos sobre la salud humana van de un olor dañino a concentraciones de aproximadamente  $0.2 \text{ mg/m}^3$  a síntomas sistémicos y muerte a concentraciones entre 1 000 y 2 250  $\text{mg/m}^3$  con exposiciones entre 15 y 60 minutos. En el caso de la energía geotérmica, las concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  están, por lo general, por debajo de los niveles tóxicos, pero el  $\text{H}_2\text{S}$  es un problema debido a su olor y a su reactividad química. Las implicaciones de esto último pueden incluir corrosión de metales, ennegrecimiento o manchado de pinturas y daños a la vegetación. Por ello se requiere su control en sitios específicos.

En el caso del  $\text{CO}_2$  sus emisiones no crean problemas ambientales cerca de la planta o emplazamiento, sin embargo su contribución al aumento de la concentración global de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es de una magnitud similar a la originada por una planta de generación alimentada con carbón.

El amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) no crea problemas por si mismo debido a su rápida difusividad, a niveles aceptables, en la atmósfera mediante los diversos procesos atmosféricos. Sin embargo, si el  $\text{NH}_3$  reacciona con otros compuestos químicos puede dar lugar a impactos ambientales perjudiciales; por ejemplo, el amoníaco puede reaccionar con el  $\text{H}_2\text{S}$  para formar sulfato de amonio, el cual es perjudicial al medio ambiente. De nuevo las condiciones específicas del sitio o emplazamiento pueden requerir de controles para este contaminante.

Finalmente, en la porción de gases no condensable del vapor geotérmico se encuentran trazas de Radón-222, sin embargo no se ha establecido que ellos representen problema alguno para la operación de la planta. De cualquier manera sería conveniente y necesario realizar estudios sobre los posibles impactos del Radón al medio ambiente y a los seres humanos.

En cuanto a residuos sólidos, la mayoría de las aguas geotérmicas calientes contienen grandes cantidades de sólidos disueltos y metales pesados. Por lo general estas aguas contienen soluciones de sodio, potasio y cloro con grandes concentraciones de sílices, boro, azufre, amoníaco, fluoruros y trazas de metales. Las aguas geotérmicas de desecho, previo tratamiento pueden ser reinyectadas al reservorio, evaporadas, desalinizadas y reusadas, sin embargo, el método específico para disposición y/o aprovechamiento de estos desechos dependerá de las condiciones hidrológicas locales, de las necesidades o requerimientos de agua, de las disposiciones ambientales pertinentes y otros aspectos que salen del objetivo del presente trabajo. En México se tiene una importante experiencia en el desa-

rrrollo y operación de campos geotérmicos (de alta entalpía) para la producción de energía eléctrica y en el aprovechamiento de compuestos (KCl, LiCl y  $\text{CaCl}_2$ ) que se encuentran en la salmuera de desecho (el primero de ellos se usa como fertilizante).

Los hundimientos del terreno pueden representar un problema para el desarrollo de campos geotérmicos y, claramente, esto dependerá de la topografía del terreno y de la densidad de pozos. Los hundimientos de terreno parecen ser un problema para campos geotérmicos de fase líquida dominante; en el caso de los campos geotérmicos de fase vapor dominante, los hundimientos del terreno no parecen representar problema alguno, debido a que la formación de estos campos requiere de la presencia de roca que no es sujeta de compactación y hundimientos. Finalmente, otro de los problemas con el aprovechamiento de esta fuente de energía lo constituye el ruido que puede alcanzar niveles de 120 decibeles en la vecindad de pozos no silenciados. Con sistemas silenciadores se pueden tener niveles por debajo de los 100 decibeles y remover las altas frecuencias que se presentan.

#### • **Hidroelectricidad**

La hidroelectricidad da lugar a efectos ambientales de ambos tipos, positivos y/o negativos. Algunos de los aspectos positivos son dependientes del sitio de emplazamiento (por ejemplo, control de avenidas y regulación de flujos). La construcción de presas y la creación de lagos artificiales puede tener impactos positivos o negativos, dependiendo del sitio, sobre el turismo y las actividades recreativas. Ellas pueden causar impactos adversos en el ciclo hidrológico, la calidad del agua, la ecología de los ríos, migración de peces, así como la destrucción de paisajes naturales valiosos y ecosistemas. Pero también, pueden tener efectos positivos dependiendo del sitio particular del emplazamiento.

Uno de los principales problemas de este tipo de aprovechamientos estriba en la inundación de áreas productivas y de asentamientos humanos con el correspondiente desplazamiento de la población, su reubicación y adaptación al nuevo entorno, así como los problemas de compensación. Otro elemento importante, es el asociado con el debate y la reacción pública ante la potencial pérdida de tierras productivas. De nuevo, dependiendo del sitio del emplazamiento y su entorno socio-económico, otro impacto positivo o negativo podría ser el desarrollo del área debido a la apertura de medios de comunicación y transporte.

En cuanto a la calidad del agua, las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua que deja una presa pueden diferir de manera significativa de las del agua que entra al reservorio. Las fluctuaciones estacionales de temperatura resultantes del régimen energético de la localidad pueden causar estratificación de la densidad, olores de aguas estancadas, reducción de oxigenación del agua y cambios en la calidad y cantidad de los sedimentos río abajo con impacto sobre la vida acuática presente.

Como se expresó en párrafos anteriores los impactos pueden ser positivos o negativos dependiendo del sitio del emplazamiento y tendrán que ser analizados y estudiados de manera integral. En el mundo en general y en México en particular, en años recientes ha cobrado interés el potencial que existe para el aprovechamiento de esta fuente energética mediante desarrollo o aprovechamiento a pequeña escala, debido a que involucran el uso de tecnologías relativamente simple, no requieren de grandes extensiones de terreno y parecen presentar otros beneficios ambientales al no requerir líneas de transmisión de alto voltaje, reemplazan otros combustibles que requieren de su transportación a la localidad y con ello implican riesgos de transportación y otros.

### • **Energía eólica**

Los generadores eólicos han sido usados en forma descentralizada por siglos, primero para proporcionar fuerza motriz y más recientemente para la generación de electricidad a pequeña escala. En años recientes, se ha dado una mayor atención a esta fuente de generación eléctrica a gran escala a través de las llamadas "granjas eólicas", ubicadas en áreas favorables para este propósito.

Los impactos ambientales provenientes del aprovechamiento de la energía del viento son, en general, de pequeña magnitud y se les clasifica en contaminación visual, por ruido, interferencia a las señales de televisión, y otras. De hecho, los impactos visuales son, en alguna medida, subjetivos, por ejemplo, los molinos de viento en Holanda no son considerados como ofensivos visualmente. Los problemas de ruido originados por el aprovechamiento de la energía del viento provienen de dos aspectos, los originados por el generador y otros dispositivos y el originado por el flujo del aire a través de las aspas del rotor. Otro elemento de riesgo lo constituye la posibilidad de desprendimiento de las aspas de su estructura de soporte o del colapso de la estructura ante velocidades de viento que exceden las velo-

ciudades de diseño.

### **Impactos ambientales originados por el uso de la energía de la fisión nuclear**

Al igual que en el ciclo de los combustibles fósiles, el uso de la energía nuclear proveniente de la fisión nuclear requiere que los efectos producidos por una serie de operaciones con ella sean tomados en cuenta. Estas operaciones se ubican en la extracción y purificación del uranio localizado en los depósitos minerales, la conversión del uranio a formas más apropiadas de combustible y su conversión subsecuente a energía útil en un reactor nuclear, la gestión del combustible gastado y la gestión de los desechos radioactivos provenientes de estas operaciones y el decomisionamiento de los emplazamientos nucleares.

Al igual que para el resto de las energías, en esta sección analizaremos, brevemente, las implicaciones ambientales asociadas con el ciclo del uranio, centrando nuestra atención en los aspectos asociados a la generación eléctrica. En otras palabras, si bien reconocemos los riesgos y posibles impactos ambientales de actividades relacionadas con la extracción, beneficio, conversión, enriquecimiento y fabricación de combustibles, no las analizaremos en este trabajo y sólo nos limitaremos a analizar los impactos ambientales asociados con la generación de electricidad en las plantas nucleares.

La generación eléctrica por medio de reactores nucleares puede presentar impactos ambientales debidos a la naturaleza radioactiva del combustible y a factores no radioactivos. De estos últimos, los más importantes son el uso de tierra y las descargas térmicas. El uso de tierra incluye la planta de generación en sí y los sitios para almacenamiento del combustible gastado, así como las áreas exclusivas que pueden tener diversos usos pero que no pueden ser usadas para residencia permanente. Al igual que la generación de electricidad con combustibles fósiles, las descargas térmicas de la planta nuclear pueden afectar el medio ambiente local.

La operación del reactor nuclear genera una gran variedad de productos de fisión y de activación. En principio, todos los productos de la fisión permanecen en los elementos combustibles, sin embargo hay la posibilidad de que algunos escapen hacia el moderador. La mayoría de los isótopos radioactivos liberados al moderador son removidos de éste por aerotransportación y por los sistemas de procesamiento de los líquidos de desecho.

Sin embargo, de manera eventual puede ocurrir que algún material radioactivo (tritio, Criptón-85, gases nobles, Iodo-131, Carbono-14, etcétera) sea liberado al medio ambiente.

Los desechos sólidos provenientes de una planta nuclear de generación eléctrica incluyen el combustible gastado si se decide no reaprovecharlo, esto es si se decide su disposición final. En este caso, el combustible no es reprocesado para recobrar el uranio y plutonio y, por tanto, disposición final. Por lo general, estos desechos son mantenidos en tanques de enfriamiento para que los productos radioactivos de vida media corta decaigan y el calor generado por estos procesos sea removido. La gran cantidad de intervenciones humanas requeridas y la complejidad de los sistemas involucrados, así como la dispersabilidad de algunas de las sustancias radioactivas procesadas, son elementos que pueden incrementar la posibilidad de accidentes y malfuncionamiento en las centrales nucleares. Pueden presentarse fugas y derrames de soluciones radioactivas por lo que hay que estar protegidos contra ellas y, en la eventualidad de su ocurrencia disponer de controles adecuados, ya que estas pueden contaminar el emplazamiento, áreas de trabajo, y existe la posibilidad de que se contamine un entorno más grande. Tal vez, la mayor preocupación con la utilización de plantas nucleares se ubique en el temor a un accidente mayor, accidente que involucre la fusión del núcleo del reactor con la posible liberación de sustancias radiactivas al medio ambiente. En la eventualidad de tal accidente los impactos al medio ambiente y población, si la planta se ubica cerca de un centro poblacional, serían de gran envergadura y a lo largo del tiempo. De hecho, esto constituye una hipótesis extrema y por lo general las plantas nucleares son diseñadas y construidas de forma tal que la probabilidad de que ocurra un accidente de este tipo es muy baja.

En caso de que la decisión sea en el sentido del reprocesamiento del combustible gastado o quemado, la cantidad corresponde, aproximadamente, a un tercio de la carga total de cada año. Una vez que se remueven las barras con combustible quemado del núcleo del reactor, éstas se almacenan, inicialmente, en albercas llenas de agua para que los productos radioactivos de vida corta decaigan y se remueve el calor generado durante el proceso. Después de este enfriamiento, el combustible quemado, el cual contiene radionuclidos de alta radioactividad y vida larga, puede ser reprocesado inmediatamente o colocado en depósitos que lo conservan en condiciones controladas por largo tiempo, dejando abierta la opción de reprocesamiento futuro o disposición final. Al parecer, actualmente se reproce-



san cantidades relativamente pequeñas comparadas con las cantidades generadas por las plantas nucleares en operación.

Burdamente hablando, durante el procesado del combustible quemado se separan el uranio y plutonio de los productos de fisión activos, los cuales constituyen los desechos de alto nivel. El uranio recuperado puede ser vuelto a enriquecer y usado en nuevos elementos combustibles para el reactor nuclear, en tanto que el plutonio reciclado puede ser usado en reactores tipo *breeder*. Sin embargo, esto introduce un flujo de plutonio purificado y con ello medidas de seguridad específicas para este material. El paso de reprocesamiento es el más importante con respecto a la generación de desechos y por ello es un paso crucial en la gestión de desechos y protección radiológica. Dependiendo del nivel de actividad, estos desechos requerirán tratamiento adecuado antes de ser dispersados al medio ambiente o almacenados. Estos desechos pueden presentarse en forma gaseosa, líquida o sólida. Los más importantes radionuclidos presentes en los efluentes son: Tritio, Iodo-131, C-14 y los radioisótopos del Rutenio, Estroncio y Cesio.

En cuanto a la gestión de los desechos generados en los diferentes pasos del ciclo combustible del uranio al inicio del mismo (minado y beneficio) se genera el mayor volumen de desechos, en tanto que en las etapas finales (operación del reactor, combustible quemado y reprocesamiento) del mismo se generan los residuos radioactivos. Usualmente se clasifica a estos desechos por su nivel de actividad (baja, intermedia y alta).

Los desechos de bajo nivel suelen ser enterrados en depósitos preparados a poca profundidad o en el mar. Claramente, en el primero de los casos es necesario proteger y aislar los desechos de la acción del agua y del público. Ya sea en tierra o en el mar es necesario conocer y estudiar los posibles caminos de la radioactividad hacia el hombre.

En cuanto a los desechos de nivel intermedio, éstos pueden ser dispuestos mediante diversos métodos, tales como su disposición en el mar, entierro en depósitos apropiados a poca profundidad, todo ello bajo condiciones ambientales particularmente favorables o en depósitos geológicos profundos.

En caso de que el combustible quemado no se reprocese, éste es de alto nivel. Si el combustible quemado es reprocesado, los productos de fisión y otros elementos que se producen a partir del uranio y plutonio en el reactor nuclear constituyen desechos radioactivos de alto nivel. Una de las técnicas más estudiadas para disponer de estos residuos consiste en la so-



lidificación de ellos para reducir el riesgo de dispersión al medio ambiente durante su almacenamiento o disposición final.

La disposición en formaciones geológicas aisladas requiere depositar los desechos en contenedores especiales, en depósitos profundos prácticos en formaciones geológicas estables y aisladas del agua y la biósfera. Algo semejante se tiene en el caso de la disposición en el lecho del mar. De hecho, los estudios y experimentos realizados a la fecha para disponer de estas alternativas se encuentran en un estado de mayor avance en el caso de la disposición en tierra continental que en mar.

Por el momento, todos los desechos radioactivos de alto nivel se almacenan temporalmente en espera de la decisión de cuándo y en qué condiciones deberá ser implementada la disposición final de ellos. Ciertamente, este aspecto es percibido como uno de los más importantes temas ambientales relacionados con el desarrollo de la generación eléctrica por medios nucleares. Es por ello que las tres áreas más importantes en las que se ha concentrado el esfuerzo para minimizar el impacto ambiental de los desechos radioactivos de alto nivel del ciclo nuclear se ubican en:

- La localización e identificación de depósitos permanentes adecuados para el aislamiento de largo plazo de desechos de alto nivel;
- Desarrollo de sitios apropiados de almacenamiento provisional, en tanto se identifican los sitios de depósito permanente; y,
- El desarrollo de la tecnología adecuada para el tratamiento de los desechos.

En la literatura general se puede encontrar una amplia discusión sobre los métodos para tratamiento y disposición geológica de los desechos radioactivos de alto nivel, así como sobre las posiciones y actitudes en diversos países respecto al tema.

Para finalizar, prestemos un poco de atención a la problemática del decomisionamiento de centrales de generación eléctrica a base de energía nuclear.

La vida operacional de un reactor nuclear en una planta de generación nuclear se estima entre treinta y cuarenta años. Si el reactor ha sido operado mediante procedimientos adecuados como es el caso de limitada contaminación de sus componentes y una vez que el combustible es removido, la radioactividad presente en el reactor a ser decomisionado se verá limitada, esencialmente, a productos de activación neutrónica en las com-

ponentes dentro y próximas a la vasija del reactor. Las opciones disponibles para el decomisionamiento se realizan de manera progresiva, desde su apagado hasta el desmantelamiento completo del reactor y dedicación del sitio a otros usos. De hecho, la elección es tanto económica como técnica. Desde luego, la estimación de los impactos ambientales constituye un factor importante en la determinación de los costos del decomisionamiento. De manera muy general se reconocen tres pasos fundamentales en el proceso de decomisionamiento total de una planta nuclear, a saber:

***Puesta en reserva o inactiva:*** este paso está diseñado para proporcionar seguridad al público y el medio ambiente a bajo costo inicial. La planta estará bajo continua vigilancia y podría, si se desea, ponerse en operación de nuevo.

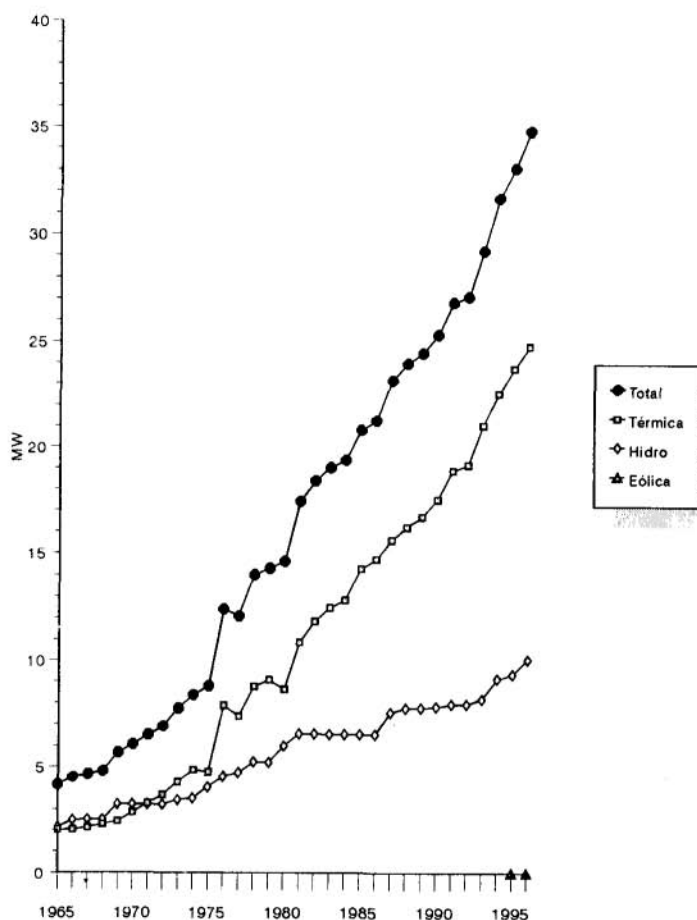
***Enterramiento:*** este proceso o acción es, en esencia, un proceso irreversible y requiere de la remoción de fluidos radioactivos, de desechos y componentes radioactivos seleccionados, así como del sellado final del reactor. En ambos pasos se requiere la remoción del combustible del reactor.

***Desmantelamiento y remoción:*** este paso involucra la remoción de cualquier restricción sobre el acceso al área y, en esencia, su restauración a su estado original. Claramente, este paso es el más costoso de la operación de decomisionamiento, aunque, a diferencia de los dos previos no se requiere de vigilancia.

A la fecha, sólo unos cuantos reactores nucleares han sido decomisionados, sin embargo e independientemente de ello se considera que el decomisionamiento final completo se encuentra dentro de las capacidades tecnológicas actuales y en todo caso sólo se requeriría el desarrollo de algunas técnicas y equipos especiales.

## **El sistema eléctrico mexicano**

La capacidad instalada en el sector eléctrico mexicano se muestra en la Figura 1 dividida en sus dos componentes principales, termoeléctrica e hidroeléctrica. A fines de 1995 la capacidad instalada del sistema de generación mexicano contaba con 33 037 MW, de los cuales 28.24 por ciento correspondió a capacidad hidroeléctrica, 71.75 por ciento a capacidad térmica y 0.01 por ciento a eólica. En 1995, el Sistema Eléctrico Nacional tenía



Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 1.** Sector eléctrico mexicano: capacidad eléctrica instalada, 1965-1996.

168 plantas de generación en operación con un total de 577 unidades de generación.

En términos generales, 61 por ciento de estas unidades de generación tenía 24 años o menos; 28 por ciento 15 años o menos, lo que significa que estas últimas están a la mitad de su vida útil. La primera de las dos unidades de la planta nuclear de Laguna Verde fue integrada al sistema eléctrico

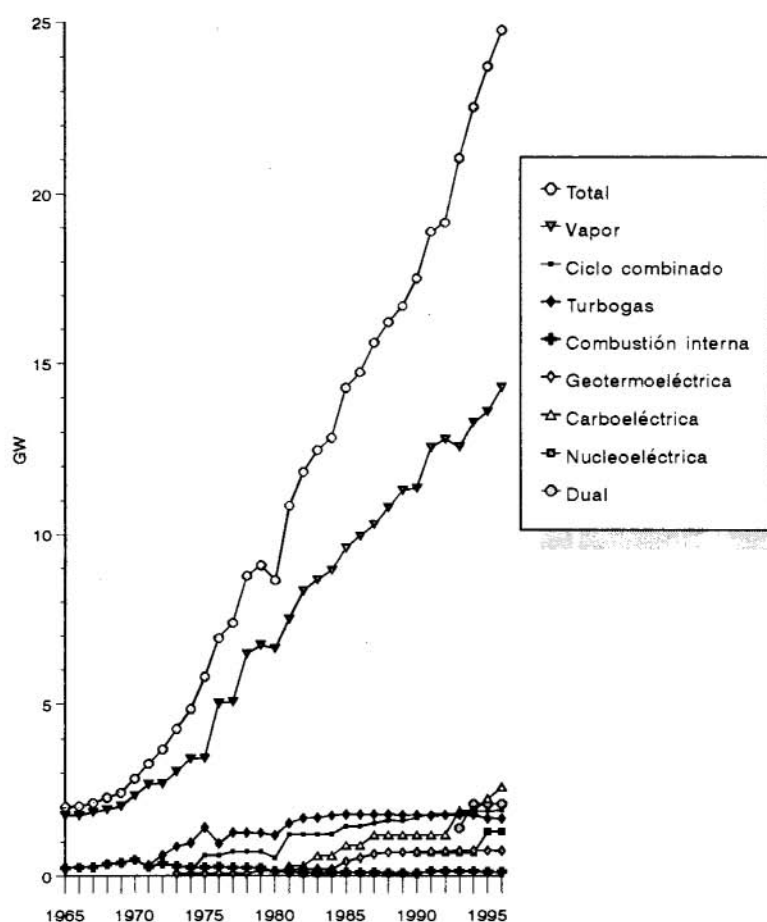
co nacional en 1989 y la segunda unidad en abril de 1995. En la Figura hemos incorporado la contribución de energía eólica con el propósito de indicar que el sector eléctrico está comenzando a incorporar capacidad basada en fuentes renovables<sup>β</sup>.

En la Figura 2 se muestra la estructura de la capacidad termoeléctrica instalada por tipo de tecnología a lo largo del período 1965-1995. El pensar en la generación por tipo de tecnología es equivalente a pensar en términos del tipo de combustible que emplean. En otras palabras la generación eléctrica se realiza en centrales cuya denominación está ligada al energético que emplean, tal es el caso de las centrales denominadas termoeléctricas que trabajan a base de combustóleo, carbón o gas; las centrales de ciclo combinado que operan con combustible diesel o gas; las de combustión interna con combustóleo y diesel; las nucleoelectricas a partir de la fisión nuclear; las hidroeléctricas que aprovechan la energía potencial del agua y las geotermoeléctricas que utilizan el vapor producido por la energía térmica de la tierra en mantos de agua subterráneos. Con excepción de las hidroeléctricas, geotermoeléctricas y de combustión interna el proceso emplea el vapor de alta presión para transformar la energía calorífica en energía cinética y esta energía mecánica en energía eléctrica mediante el generador acoplado a la turbina.

Por lo que respecta a la estructura del consumo de combustibles, la Figura 3 muestra la evolución histórica de éstos a lo largo del periodo 1965-1995. Se observa el fuerte dominio del combustóleo seguido de la hidroenergía y el gas. En 1995 la estructura de la generación térmica por combustibles fue la siguiente: combustóleo (59.2%), gas (15.8%), carbón (11.9%), nuclear (7.3%), geotermia (4.9%) y diesel (0.9%).

En 1995, del total de la energía generada, 80.66 por ciento fue térmica y 19.34 por ciento hidroeléctrica (Figura 4). Hasta el año 1970 la generación fue dominada por la hidroelectricidad, sin embargo su importancia relativa comenzó a declinar sistemáticamente versus la generación térmica a base

<sup>β</sup> De acuerdo al Balance Nacional de Energía de 1995 se tienen contribuciones de tipo eólico y solar. En el caso de la solar, la contribución es de 216 230 m<sup>2</sup> de calentadores solares con una eficiencia promedio del 63 por ciento, radiación solar promedio de 4 500 kcal/m<sup>2</sup> por día y una generación de 0.223 billones de kcal, por otra parte, la contribución fotovoltaica cuenta con una capacidad instalada de 9.5 MW, seis horas diarias de radiación promedio, un factor de planta de 80 por ciento y una generación de 0.015 billones de kcal. En cuanto al viento se tiene una capacidad instalada de 350 kW con un factor de planta de 20 por ciento y una generación de 500 millones de kcal, adicionalmente se tienen instalados dos megawatt conectados a la red eléctrica. La principal aplicación de la generación fotovoltaica se ubica en el área de electrificación rural, comunicaciones, bombeo de agua y señalización carretera y marítima.

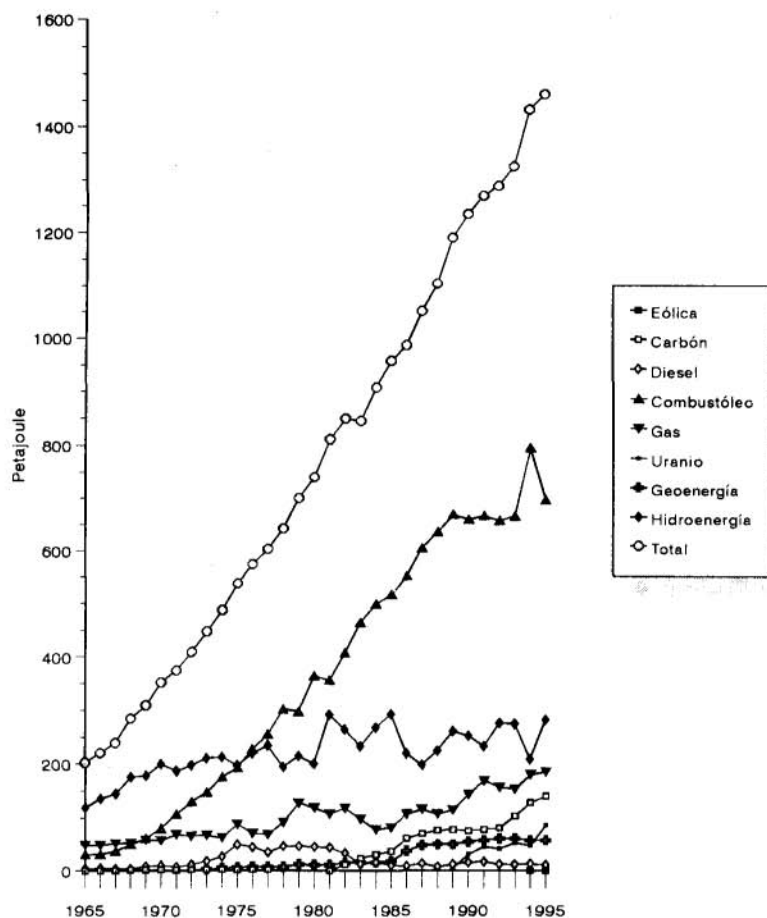


Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 2.** Sector eléctrico mexicano: capacidad termoelectrica instalada por tipo de tecnología, 1965-1995.

de combustóleo. Posteriormente, en un esfuerzo por diversificar las fuentes de energía para generación eléctrica, se añadieron el carbón, la geotermia y la energía nuclear.

En promedio, durante 1995, las plantas de vapor alcanzaron una eficiencia térmica bruta promedio de 34.58 por ciento; las turbogas operaron con una eficiencia bruta de 19.99 por ciento; las de combustión interna con 39.47 por ciento; las de ciclo combinado con 38.10 por ciento; las operadas

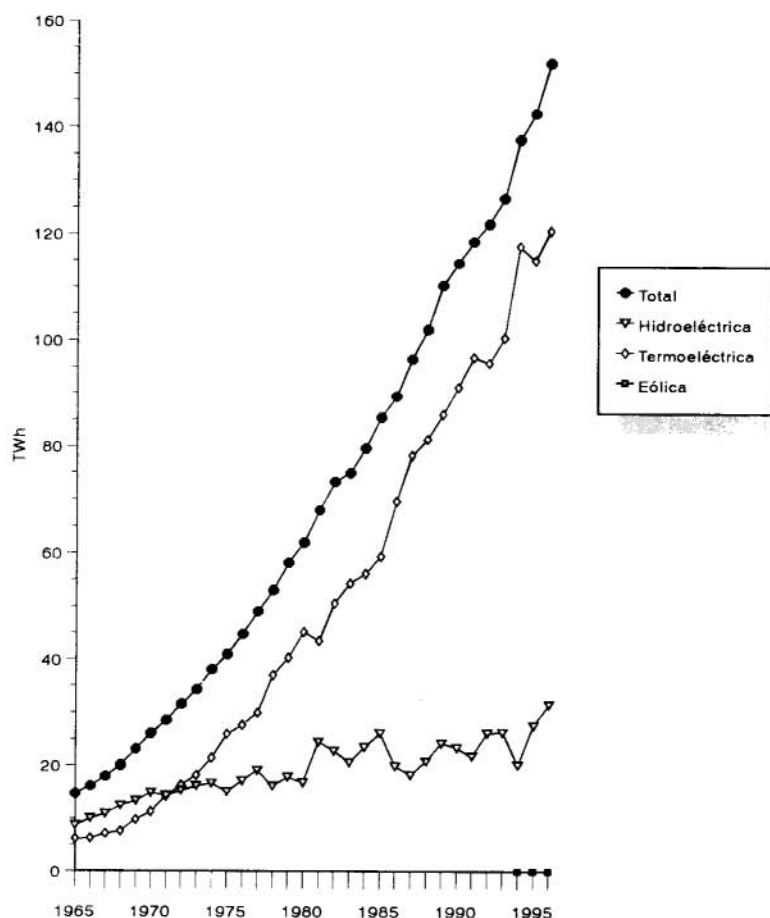


Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 3.** Sector eléctrico mexicano: consumo de energía por tipo de combustible, 1965-1995.

a base de carbón con 37.13; la nuclear con 32.69; las hidroeléctricas y geo-termoeléctricas operaron con una eficiencia bruta promedio de 35.12 por ciento. El sistema eléctrico nacional (la parte térmica constituida por carbóelectricas, termoeléctricas a base de combustóleo y gas, nucleares, ciclo combinado, turbogas y combustión interna) operó con una eficiencia bruta promedio de 34.96 por ciento durante 1995.

A nivel nacional el sector eléctrico consumió, en 1995, el 18.03 por



Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 4.** Sector eléctrico mexicano: evolución histórica de la generación eléctrica, 1965-1995.

ciento de la oferta interna de energía, ubicándose en el tercer lugar, después del sector industrial y del transporte, de importancia en el consumo. En el período 1990-1995 su participación porcentual se mantuvo más o menos estable hasta 1993 y en los dos últimos años se ha venido incrementando de nuevo. En términos absolutos ha crecido a una tasa anual del 3.18 por ciento en el período 1990-1995, en tanto que la generación lo ha hecho a una tasa anual de 4.5 por ciento. La participación hidroeléctrica en la ge-



neración durante el mismo período ha mostrado su dependencia con la disponibilidad del recurso agua y después de disminuir en el período 1989-1991 incrementó su participación entre 1991 y 1993, para volver a disminuir en 1994 e incrementarse en 1995 por encima del nivel de 1993. Durante el período 1990-1995 la tasa promedio anual de crecimiento de la contribución hidroeléctrica a la generación fue de 3.4 por ciento en tanto que la de la termoeléctrica fue de 4.8 por ciento.

### **Escenarios de capacidad, generación y combustibles para el sector eléctrico**

Esta sección está basada en las proyecciones de demanda de energía obtenidas mediante el empleo del modelo de demanda de energía primaria y final (MODEMA)<sup>Y</sup> en el corto y mediano plazos desarrollado por el autor en el Programa Universitario de Energía de la UNAM y por medio del cual se establecen las proyecciones mencionadas a nivel nacional, sectorial y subsectorial, así como la mezcla de combustibles en cada uno de los sectores y subsectores. El modelo es de simulación y permite proyectar la demanda de energía a lo largo del período seleccionado y para diferentes escenarios de crecimiento económico y poblacional. El modelo desagrega la economía nacional en dos grandes divisiones: la división de sectores productivos (PEMEX, CFE, Agropecuario, Comercial, Público y de Servicios, Transporte e Industrial) y la de sectores consumidores (Residencial). Asimismo, tiene la posibilidad de incorporar los efectos de diversas políticas (sustitución de combustibles, conservación, etcétera).

El modelo considera ocho grandes sectores, mencionados en el párrafo anterior; 16 subsectores industriales (petroquímica de PEMEX, siderurgia, química, azúcar, cemento, celulosa y papel, vidrio, fertilizantes, cerveza y malta, aguas envasadas, construcción, automotriz, hule, aluminio, tabaco y otras); cinco subsectores de transporte (auto-transporte, aéreo, ferroviario, marítimo y eléctrico) y dos subsectores residenciales (urbano y rural). En cuanto a los combustibles, primarios y secundarios, considera 18 (carbón, petróleo, condensados, gas no asociado y asociado, bagazo de caña, leña, coque, gas licuado, gasolinas y naftas, kerosinas, diesel, com-

<sup>Y</sup> Quintanilla, J. y M. Bauer, *Emissions of the Energy Chains in the Mexican Energy System*, Primer Taller de Estudio del País: México Ante el Cambio Climático, organizado por el INE, The U. S. Country Studies Program y UNAM, Cuernavaca, Morelos, 1994, pp. 69-92. Véase también: Quintanilla, J. y M. Bauer, *Projection of the Global, Regional and Sectorial Energy Demand and Emissions for Mexico*, 16<sup>th</sup> Congress of the World Energy Council, 4.3.13, Tokyo, Japan, 1995.

bustóleo, gas, electricidad, nucleenergía, geoenergía e hidroenergía), incluye siete energéticos que son empleados como materia prima en las diferentes industrias (coque, gasolina, kerosinas, combustóleo, gas, bagazo de caña y productos no energéticos).

Los escenarios de crecimiento económico considerados fueron tres: alto (ES<sub>1</sub>), bajo (ES<sub>2</sub>) y de referencia (ES<sub>3</sub>), todos ellos a lo largo del período 1995-2010 (Tabla 2). Por lo que respecta a los escenarios de población sólo se consideró uno basado en el censo de 1990 y se empleó la proyección media del INEGI, la cual corresponde a una tasa promedio anual de 1.42 por ciento a lo largo del período. Esta tasa de crecimiento implica una población total de 110 millones para el año 2010. Es importante reconocer que todos los escenarios económicos propuestos y empleados en la determinación de las proyecciones que presentaremos presuponen una caída del PIB de 4.8 por ciento para el año 1995. La información más reciente disponible indica que no fue tal el caso, por el contrario la caída fue más pronunciada de lo supuesto en los escenarios mencionados. Según la información más reciente de INEGI la caída del PIB fue casi del siete por ciento a precios de 1980. Por lo anterior, es de esperarse que las proyecciones indiquen una mayor demanda en comparación con los resultados que se obtengan al comparar con el Balance Nacional de Energía de 1995.

**Tabla 2**

**Escenarios económicos**

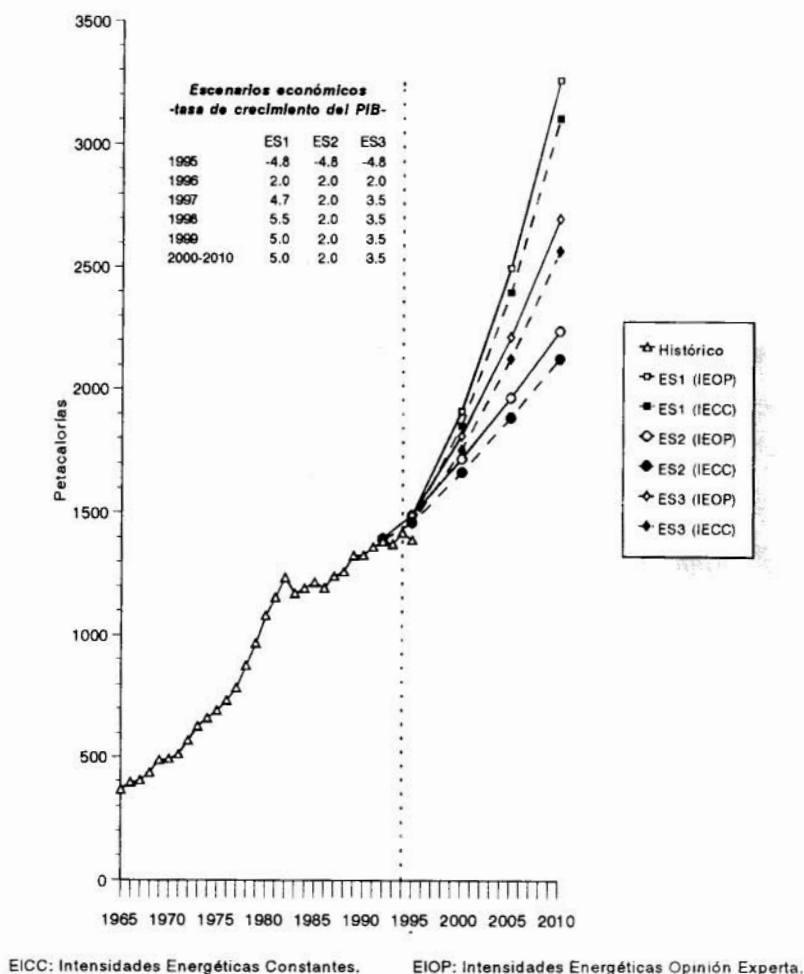
*Tasas de crecimiento promedio anual (por ciento)*

	1995	1996	1997	1998	1999	2000-2010	1995-2010
Escenario alto (ES <sub>1</sub> )	-4.8	2.0	4.7	5.5	5.0	5.0	4.8
Escenario bajo (ES <sub>2</sub> )	-4.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Escenario de referencia (ES <sub>3</sub> )	-4.8	2.0	3.5	3.5	3.5	3.5	3.4
Escenario poblacional							1.42

Finalmente, el modelo tiene la posibilidad de incorporar eficiencia energética a través de los coeficientes de intensidad energética (energía empleada por peso producido). Aunado a los escenarios económicos y poblacional, se consideraron dos opciones para las intensidades energéticas

(constante (EICC) y opinión experta (EIOP)).

La Figuras 5 y 6 muestran las proyecciones de demanda de energía total (en exacalorías) y de crudo (millones de barriles diarios) para el país a lo largo del período de proyección para cada uno de los escenarios de crecimiento económico y bajo las diferentes opciones para las intensidades



Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 5.** Demanda total de energía, 1965-2010.

energéticas. Se observa que la demanda de energía total es mayor en el caso de la opción de opinión experta para las intensidades energéticas en comparación con la correspondiente a la de intensidades constantes, esto se debe a que la opción de opinión experta incorpora, en las intensidades energéticas, un mayor uso de la electricidad en el sector residencial y un cambio en la estructura de la población y con ello un incremento en la intensidad energética del sector eléctrico.

Otro elemento que interviene en este comportamiento se ubica en que el consumo de energía en el sector transporte se ve afectado por el cambio en la estructura poblacional, sin embargo el efecto no es tan directo como en el caso de la generación eléctrica y de ahí la mayor diferencia entre los resultados para las dos opciones mencionadas.

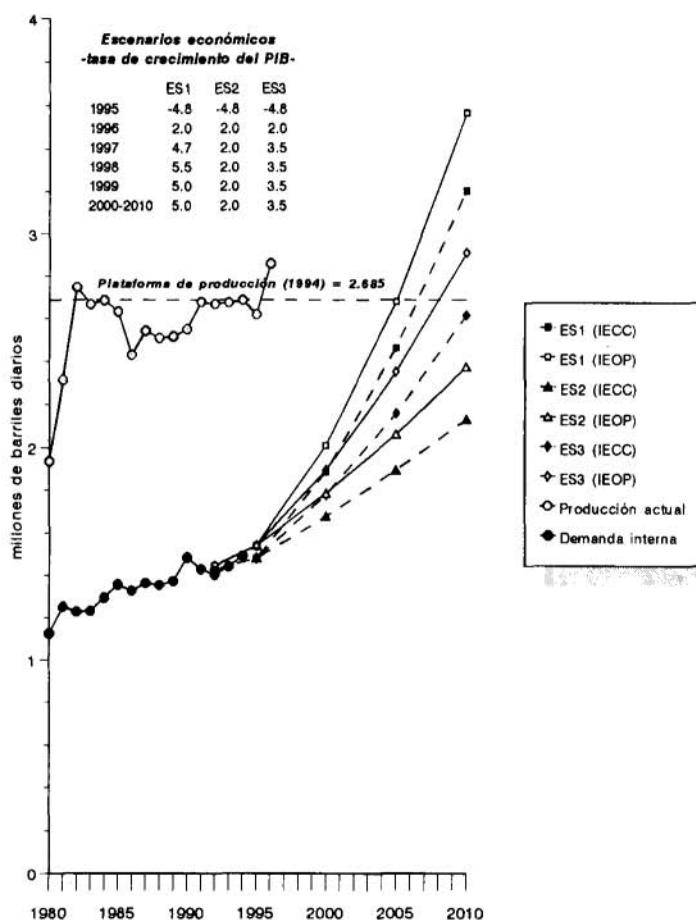
La oferta interna de crudo (barriles de petróleo por día) muestra un comportamiento semejante (Figura 6) al de la demanda total de crudo. Sin embargo, desde el punto de vista energético, representa una situación problemática para el sector petrolero.

Dependiendo del escenario de crecimiento que se considere, la demanda de crudo crece a tasas que originan que, en caso de no incrementarse la plataforma de producción (2.685 millones de barriles diarios en 1994), el país se convierta en importador de crudo, una vez más, en los años 2005 ó 2006 para el escenario de crecimiento alto (ES<sub>1</sub>) con las opciones de intensidades energéticas EIOP y EICC, respectivamente. Para el escenario de bajo crecimiento económico (ES<sub>2</sub>) con las opciones mencionadas la situación se presentaría alrededor del año 2015 para la opción EIOP y en el 2018 para la EICC. Para el escenario de referencia la situación se presentaría en el 2008 ó 2011, según la opción EIOP o EICC, respectivamente.

Adicionalmente, la Figura 7 muestra las proyecciones de procesamiento de crudo y líquidos, esto es la capacidad de refinación que se requeriría a lo largo del período. La capacidad de refinación actual es de 1.5 millones de barriles de crudo y de acuerdo a lo mostrado en la Figura 7, de darse alguno de los escenarios económicos considerados, el sistema nacional de refinación se vería en la necesidad de incrementar su capacidad en algún momento entre el año 1998 y el 2000 o importar los productos petrolíferos requeridos.

En el ámbito eléctrico, la demanda de energía eléctrica, con ello la demanda de capacidad instalada (Figura 8), y por consecuencia de combustibles fósiles, implicaría las capacidades que se muestran en la Figura.

Es conveniente mencionar que las capacidades mostradas en la Figura 8 fueron estimadas suponiendo factores de planta de 57.4 por ciento para las térmicas (el valor correspondiente al promedio de los factores de planta globales observados en años recientes) y un equivalente primario de energía de 2 524 kcal/kWh.



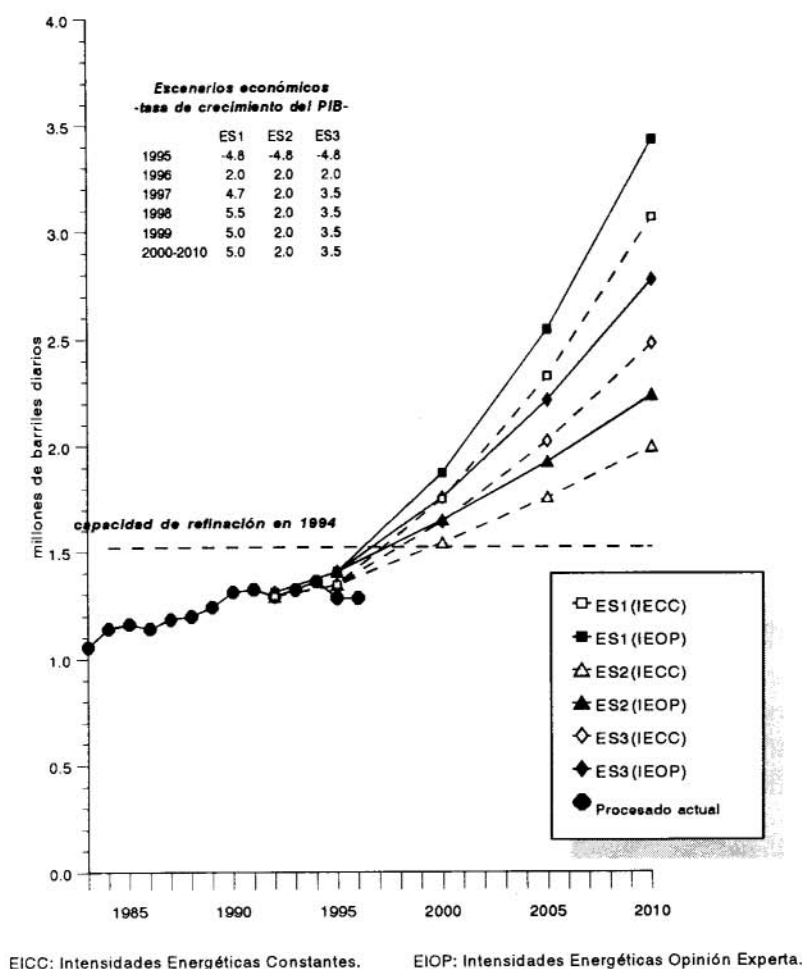
IECC: Intensidades Energéticas Constantes.

IEOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 6.** Demanda total de crudo, 1980-2010.

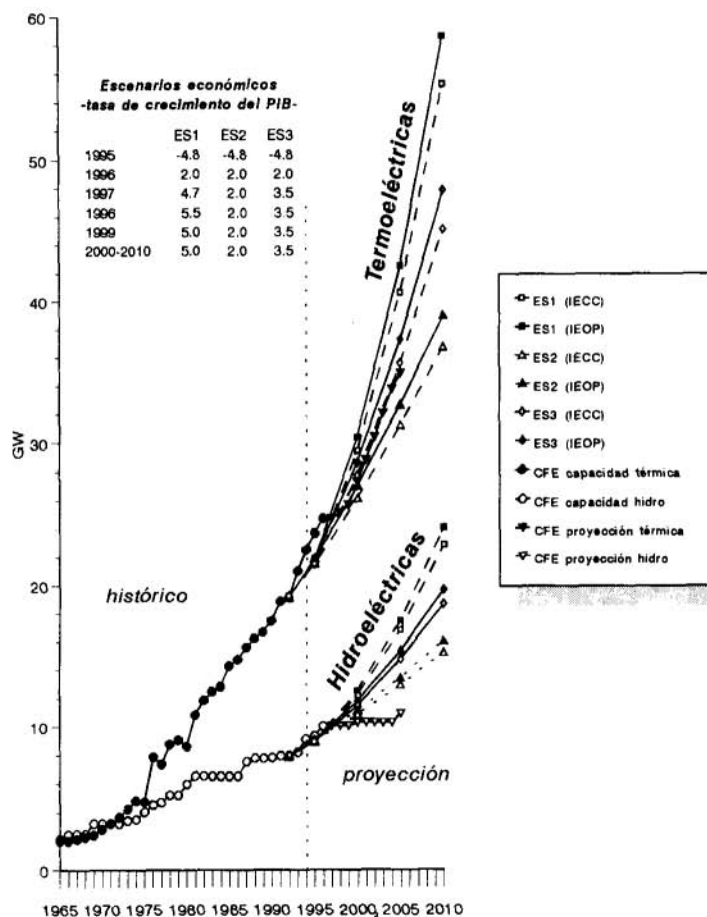
Estudios realizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y publicados por la Secretaría de Energía en el Documento de Prospectiva del Sector Eléctrico (1996-2005) indican que entre el año 1996 y 2005 se requerirían, de darse los elementos considerados en el estudio, 12 761.7 MW adicionales (de esta cifra, 2 995.7 MW bajo el rubro de capacidad com-



Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 7.** Proyecciones de proceso de crudo y líquidos, 1983-2010.

prometida y 9 766 MW bajo el concepto de capacidad adicional, esto es, no comprometida) con una tasa de crecimiento del producto interno bruto de 5.1 por ciento en el período 1996-2005. En la Figura 8 se muestra la distribución de estas proyecciones en sus componentes térmica e hidroeléctrica. Si bien el documento de referencia considera un escenario adicional,



IECC: Intensidades Energéticas Constantes.

IEOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 8.** Demanda de capacidad eléctrica, 1965-2010.



con una tasa anual promedio de crecimiento económico de 2.8 por ciento, en el cuerpo del mismo no se reporta la capacidad adicional correspondiente debido a que se considera que el escenario de crecimiento económico más probable es el de 5.1 por ciento. Por otra parte, las tasas históricas de crecimiento de la demanda indican tasas del orden de seis por ciento, lo cual es compatible con el escenario de 5.1 por ciento de crecimiento del PIB.

Las proyecciones de capacidad eléctrica vía hidráulica muestran que entre 1996 y el año 2000 se tendrían que adicionar 3 184 MW hidroeléctricos a la capacidad de 1995 (3 239 MW) bajo el escenario ES<sub>1</sub> (EIOP). En principio, tal capacidad podría ser adicionada en base a los proyectos hidroeléctricos con posibilidad de incorporarse al sistema y que cuentan con estudios de factibilidad o en proceso, los que representan una capacidad de 4 637 MW que excede en 1 453 MW la cifra que arroja el modelo. Sin embargo, esto no implica que se vaya a contar con esta capacidad hidroeléctrica ya que la decisión depende de muchos factores. Por otra parte, el documento publicado por la Secretaría de Energía sólo contempla la adición de 1 594 MW hidroeléctricos en el período 1996-2005, lo cual implicaría que la diferencia (1 590 MW), de darse el escenario de alto crecimiento económico y opción EIOP, tendría que ser satisfecha con combustibles fósiles.

Bajo este mismo escenario la generación vía medios nucleares se tendría que incrementar a los niveles de 1 094, 1 530 y 2 110 MW para los años 2000, 2005 y 2010, respectivamente. Al año 2000 esta demanda de capacidad estaría satisfecha con las dos unidades de la Central de Laguna Verde, no así en los años 2005 y 2010, en los que se requeriría una capacidad adicional de 220 y 800 MW, respectivamente, capacidad que equivaldría a dos terceras partes de la capacidad actual de Laguna Verde. Las políticas nucleares actuales no prevén adición alguna en el futuro predecible, por ello la capacidad nuclear adicional deberá ser proporcionada por otros medios. Es de suponerse que sea por medio de combustibles fósiles y, en base a las políticas actuales es muy posible que se haga por medio de gas natural en plantas de ciclo combinado.

En cuanto a la geotermia, la proyección bajo el mismo escenario que hemos comentado en párrafos anteriores indica que se requerirían las cifras de 843, 1 169, 1 634 y 2 254 MW para los años 1995, 2000, 2005 y 2010, respectivamente. El documento mencionado indica adiciones de 210 MW al año 1999 (60 MW en 1998 y 150 MW en 1999) sobre la capacidad instalada en 1995 (753 MW). Los primeros 50 MW están dentro de la capacidad com-

prometida y los restantes 160 MW dentro de la denominada capacidad adicional. De acuerdo a estos supuestos, la proyección indicaría un déficit de 90 MW en 1995, 206 MW en el año 2000 si se adicionan los 210 MW mencionados, 671 MW en el 2005 y 1 261 MW en el 2010. De nuevo, estas capacidades tendrían que ser satisfechas por medio de combustibles fósiles. Análisis semejantes se han realizado para los escenarios restantes, sin embargo no los presentamos aquí por razones de espacio.

Pasemos ahora a considerar las proyecciones de demanda de combustible para los escenarios y opciones indicadas en la Tabla 2. Las Figuras 9 a 15 muestran las proyecciones para la demanda de combustóleo, gas natural, diesel, carbón, uranio, geotermia e hidroenergía. Para los primeros cinco las unidades en que están expresadas corresponden a barriles, pies cúbicos o toneladas, según sea el caso; en cambio, en el caso de las dos últimas se expresan en barriles equivalentes a combustóleo.

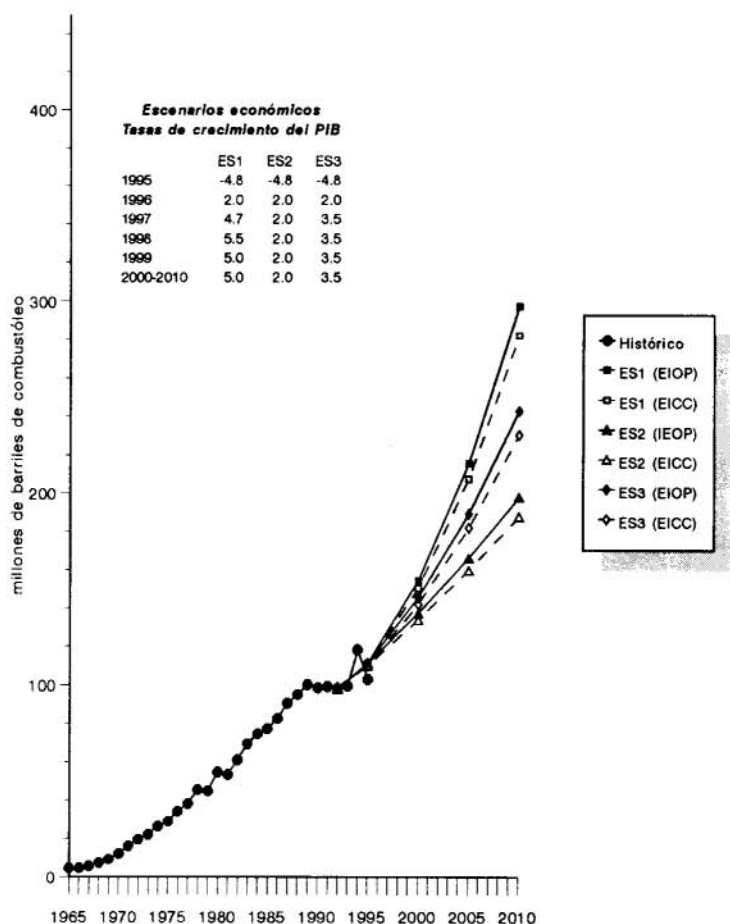
Para el caso del combustóleo (Figura 9) se observa una ligera oscilación en 1994, separándose de los valores proyectados. De hecho, en el mismo año se presentó un año seco, lo cual redujo la aportación de la hidroenergía (Figura 15), para recuperar, en 1995, niveles semejantes a los de 1993. Datos preliminares indican que en 1996 se adicionaron 703 MW hidroeléctricos a la capacidad instalada, los que representaron una contribución de la hidroenergía a la generación de unos 4 000 GWh adicionales a los generados en 1995, dando lugar a que el valor histórico, en 1996, se vuelva a parecer, muy de cerca, a los valores proyectados. Sin embargo, dados los costos de inversión de las hidroeléctricas, sus tiempos de construcción y las políticas energéticas actuales es de esperar que no se siga la trayectoria sugerida por el modelo.

De hecho, la Figura 8 muestra que la contribución hidroeléctrica a la capacidad instalada se mantendrá prácticamente fija, con un pequeño incremento en el 2005. Por otra parte, el carácter aleatorio de la hidroenergía hace que los déficits se cubran con combustibles fósiles y es de esperarse, dadas las políticas actuales, que se haga con gas natural, afectando con ello, las proyecciones de combustóleo.

En cuanto al gas natural, la Figura 10 muestra su comportamiento histórico y las proyecciones correspondientes. Se observa, por parte de las proyecciones, una buena representación de este combustible, sin embargo es de esperar que en los próximos años se presente una fuerte separación entre las proyecciones del modelo y los valores reales. Las razones de esta conclusión se ubican en la política de sustitución de combustóleo por gas

natural, la cual no se ha incorporado en los datos de entrada al modelo. Mediante futuras corridas del modelo se tendrán elementos para analizar los impactos energéticos y ambientales de tal política.

En el caso del diesel, la Figura 11 muestra las proyecciones y valores históricos correspondientes a este combustible. Se observa que los datos



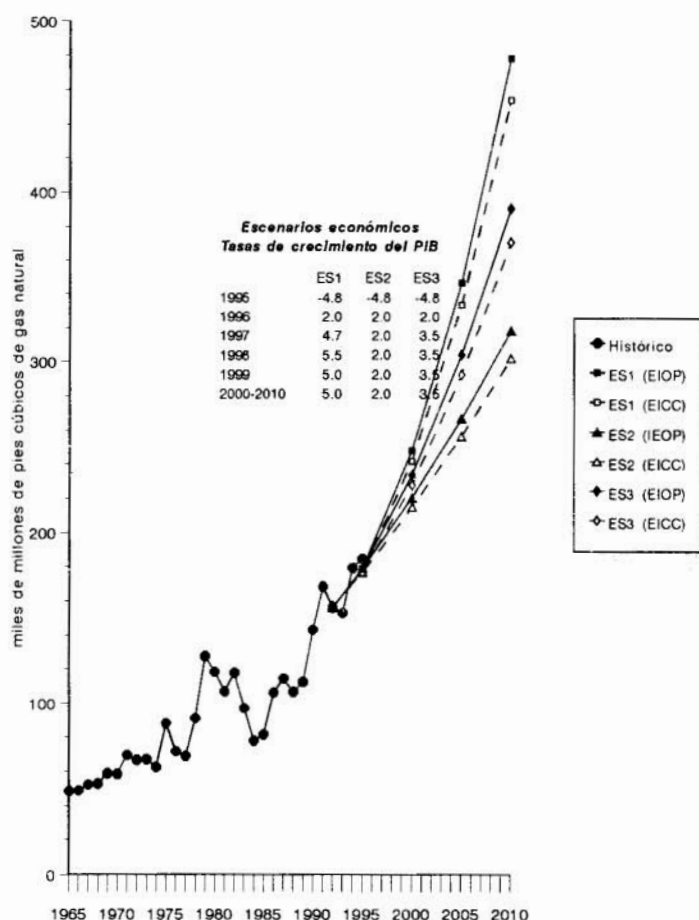
EICC: Intensidades Energéticas Constantes.

EIOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 9.** Sector eléctrico: demanda de combustóleo, 1965-2010.

históricos y las proyecciones concuerdan bastante bien en el período 1992-1994, con una apreciable diferencia en 1995. La tendencia del sistema eléctrico nacional es hacia reducir, lo más posible, su contribución, por lo que los datos de entrada al modelo habrán de ser actualizados. Es de esperarse que las nuevas corridas reflejen esta tendencia más de cerca.



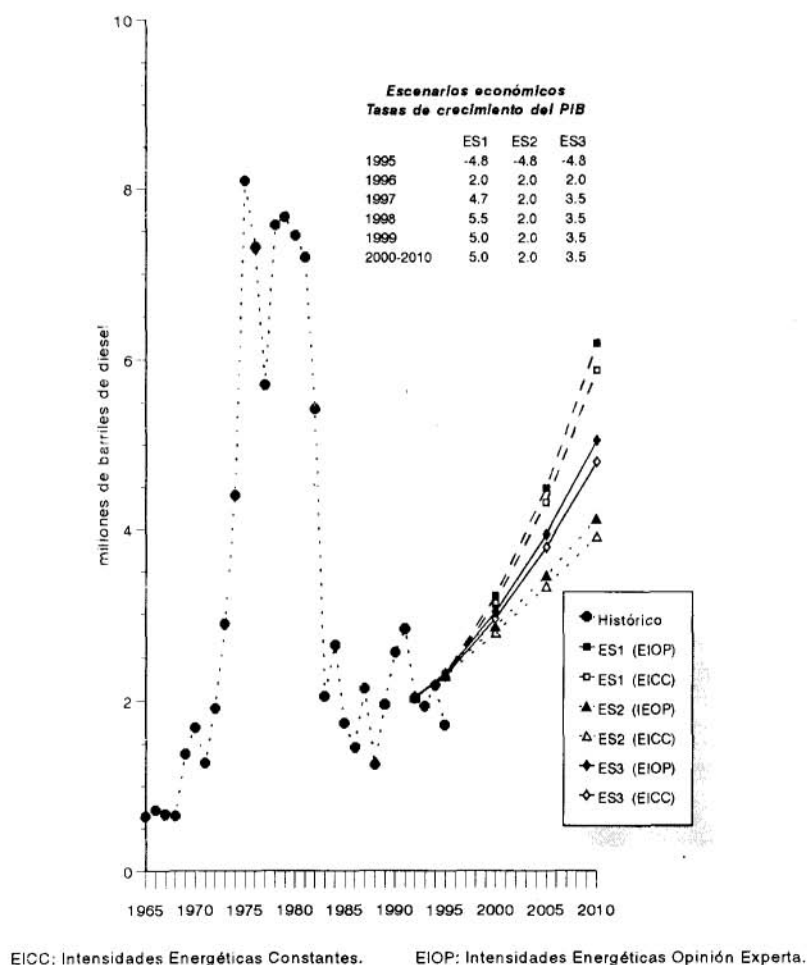
EICC: Intensidades Energéticas Constantes.

EIOp: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 10.** Sector eléctrico: demanda de gas natural, 1965-2010.

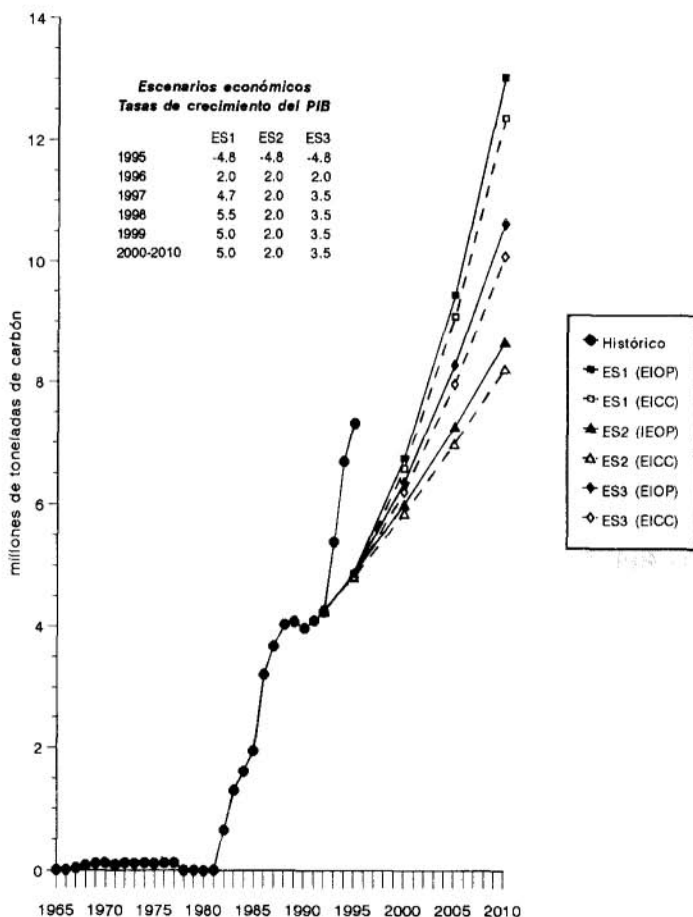
La Figura 12 muestra la evolución histórica y las proyecciones correspondientes al carbón. Se observa que la proyección queda por debajo de la evolución histórica. Esto se debe a que en años recientes, 1993 a 1995, se han adicionado 1 400 MW (700 MW en 1993, 350 MW en 1995 y 350 MW en 1996) a la capacidad instalada y con ello una mayor contribución a la



Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 11. Sector eléctrico: demanda de diesel, 1965-2010.**

generación, modificando las tendencias observadas en el pasado. De nuevo, dadas las políticas energético-ambientales actuales no es de esperarse un incremento, en el futuro previsible, de la capacidad instalada y con ello de la generación eléctrica a base de este combustible. Estos nuevos elementos habrán de modificar los datos que se alimentan al modelo y con



EICC: Intensidades Energéticas Constantes.

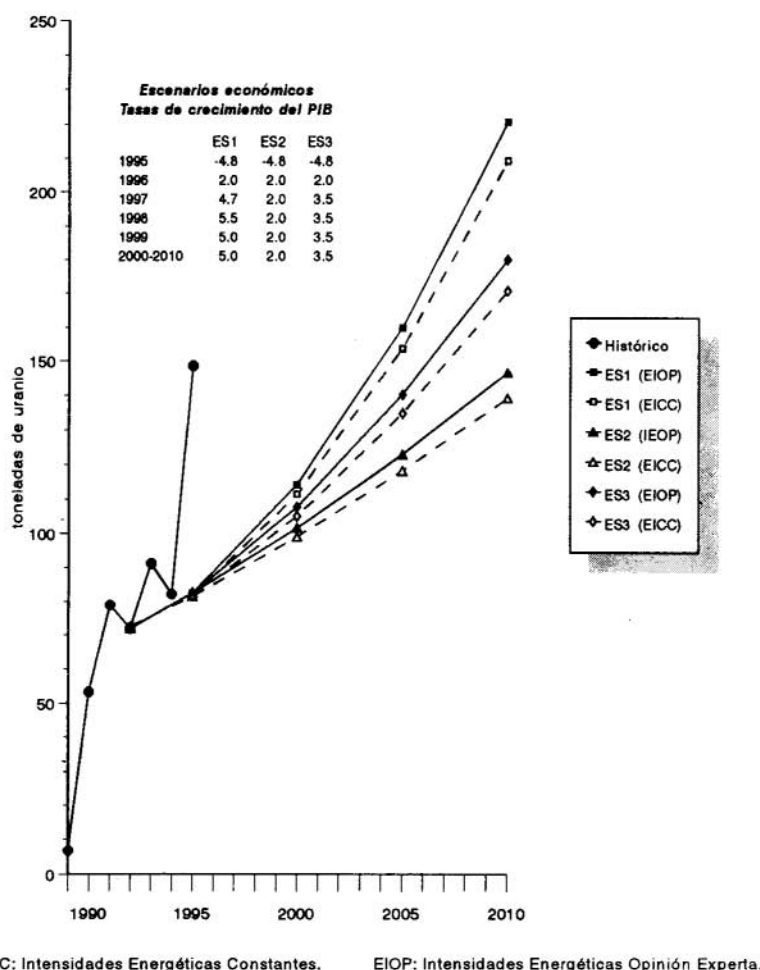
EIOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

**Fuente:** Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 12.** Sector eléctrico: demanda de carbón, 1965-2010.

ello las proyecciones correspondientes.

Comentarios semejantes se aplican al caso del uranio (Figura 13), ya que a finales de 1995 entró en operación comercial la segunda unidad de la Central Nuclear de Laguna Verde, elevando la capacidad instalada en 634 MW adicionales. No se prevé ninguna adición de capacidad mediante esta



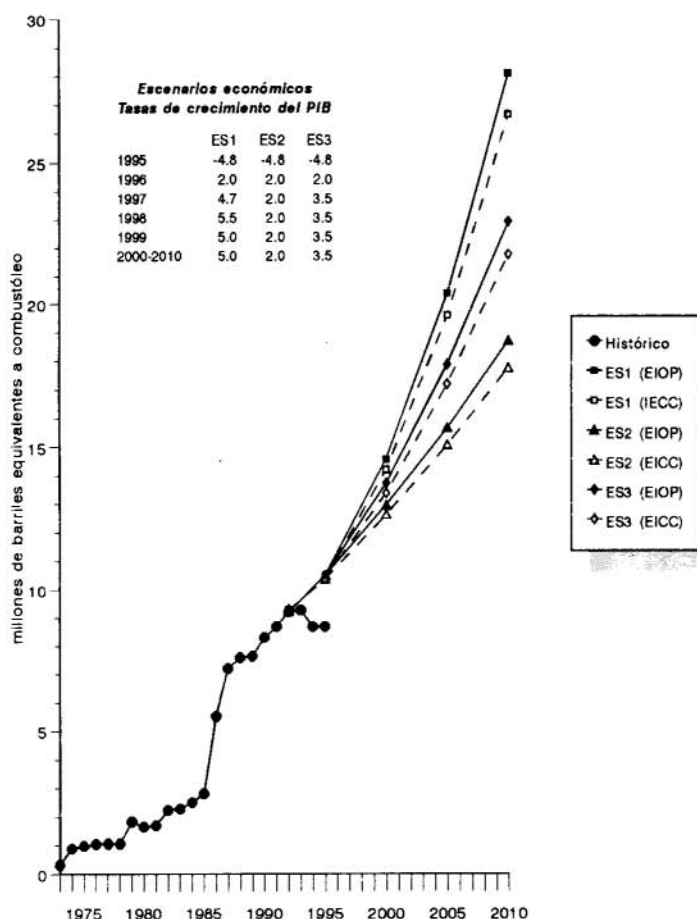
Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 13.** Sector eléctrico: demanda de uranio, 1989-2010.



fuelle por lo que se habrá de incorporar este aspecto a los datos de entrada al modelo, mediante la modificación de las tendencias históricas.

La Figura 14 muestra la evolución histórica y proyecciones para la geotermia. Para poner esta contribución en términos que permitan comparar los efectos ambientales se expresó su contribución en barriles equiva-



IECC: Intensidades Energéticas Constantes.

EIOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 14.** Sector eléctrico: demanda de geotermia, 1973-2010.

lentes a combustóleo, lo mismo ocurre con la contribución de la hidroenergía. De hecho, en este caso se tuvo una pequeña reducción en la capacidad instalada en 1996, sin embargo se tuvo una mayor generación. Se prevé una adición de capacidad instalada de 210 MW entre 1998 y el año 2000. También en este caso se observa una diferencia entre los datos históricos y las proyecciones obligando a una revisión de las tendencias y con ello de las proyecciones.

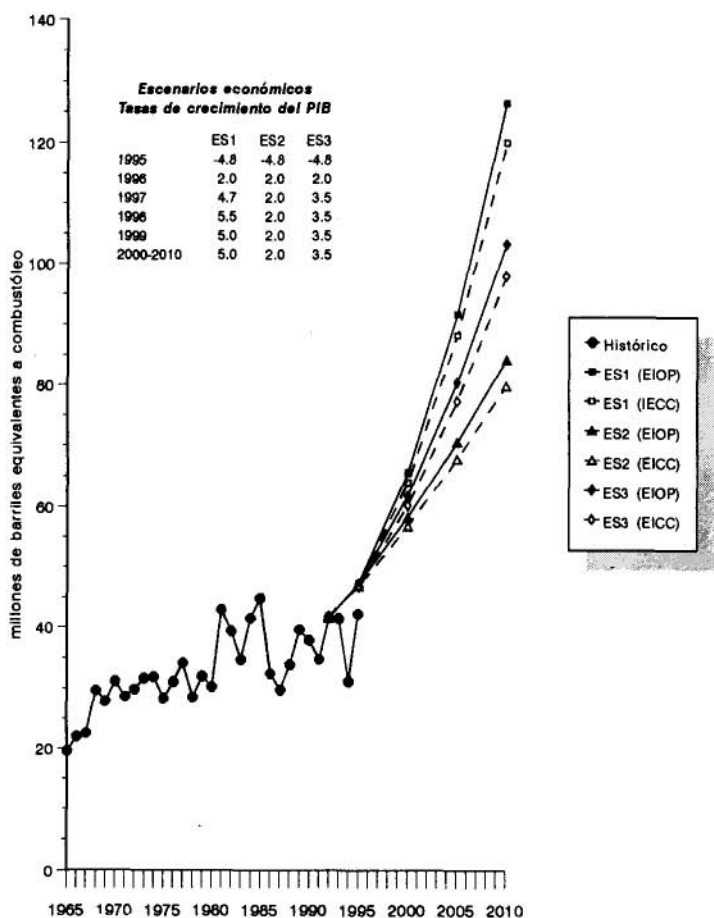
Finalmente, la Figura 15 muestra los datos históricos y las proyecciones para la hidroenergía. Además de los comentarios previos sobre esta fuente de generación, se hace patente el carácter oscilatorio de su contribución, producto de su carácter aleatorio. Los datos históricos empleados en las proyecciones arrojan una fuerte contribución de la misma en los próximos años, sin embargo las nuevas políticas energético-ambientales de años recientes hacen que las tendencias observadas se vean modificadas y con ello las proyecciones, elementos que habrán de tomarse en cuenta en las nuevas corridas.

### **Factores de emisión**

Con el propósito de estimar las emisiones contaminantes (gases de combustión, hidrocarburos no quemados y partículas) relacionadas con los usos energéticos de combustibles fósiles, la Tabla 3 muestra los factores de emisión en forma matricial entre fuente y contaminante. Resulta claro de la Tabla que los contaminantes que consideraremos en este trabajo son  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{NO}_x$ , HC y partículas. También hemos incluido los factores para  $\text{SO}_x$  debido al contenido de azufre en los combustibles mexicanos y en respuesta a la publicación de estándares ambientales para este contaminante. Asimismo, la política de sustitución de combustibles (combustóleo por gas natural) tiene efectos directos sobre algunos contaminantes, en particular, sobre los óxidos de azufre. Por otra parte, las normas ecológicas para fuentes fijas tienen efectos directos en la contribución de algunos de los Gases de Invernadero.

Los factores de emisión reportados en la Tabla 3 corresponden a los reportados en la literatura general, excepto por aquellos marcados con los superíndices d a f (véase notas a pie de la Tabla). Estos factores fueron estimados tomando en cuenta la composición química de los combustibles correspondientes y otras fuentes de información tal y como se indica en las notas a pie de Tabla.

Sin embargo, una crítica inmediata a los valores para los factores de emisión por combustible reportados en la Tabla es, precisamente, el origen de los mismos, esto es, la literatura general, excepto por los identificados por los subíndice d a f que corresponden más a las características de los combustibles mexicanos. Es por ello recomendable, llevar a cabo investi-



IECC: Intensidades Energéticas Constantes.

EIOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 15.** Sector eléctrico: demanda de hidroenergía, 1965-2010.

gaciones orientadas a establecer los factores de emisión apropiados a las características de los combustibles mexicanos, tomando en cuenta, según sea el caso, el contenido de azufre, poder calorífico, composición, contenido de cenizas, etcétera y de esta manera poder evaluar con mayor precisión el valor de las emisiones y los impactos ambientales del uso de estos combustibles, no sólo en la generación eléctrica sino, también, en las demás actividades socio-económicas del país.

Tabla 3

## Factores de emisión

Fuente	CO <sub>2</sub> tonC/TJ	CO ton/TJ	NO <sub>x</sub> ton/TJ	SO <sub>x</sub> ton/TJ	HC ton/TJ	Partículas ton/TJ
<b>Petróleo</b>	<b>20.00<sup>a</sup></b>					
Gasolina	19.42 <sup>b</sup>	10.6 <sup>b</sup>	0.41 <sup>b</sup>	0.067 <sup>d</sup>	0.0697 <sup>c</sup>	0.0405 <sup>d</sup>
Diesel	20.13 <sup>b</sup>	0.625 <sup>b</sup>	1.25 <sup>b</sup>	0.672 <sup>e</sup>	0.147 <sup>e</sup>	0.440 <sup>e</sup>
Combustóleo	21.30 <sup>b</sup>	0.0143 <sup>b</sup>	0.205 <sup>b</sup>	1.41 <sup>d</sup>	0.0936 <sup>e</sup>	0.682 <sup>e</sup>
<b>Gas natural</b>	<b>15.30<sup>a</sup></b>					
Gas natural (calderas)	15.30 <sup>b</sup>	0.02 <sup>b</sup>	0.25 <sup>b</sup>	0.00876 <sup>f</sup>	0.00774 <sup>e</sup>	0.0259 <sup>f</sup>
<b>Carbón</b>	<b>25.80<sup>a</sup></b>					
Carbón duro	25.69 <sup>b</sup>	0.01 <sup>b</sup>	0.74 <sup>b</sup>	0.542 <sup>f</sup>	0.00534 <sup>g</sup>	0.167 <sup>f</sup>
<b>Biomasa</b>	<b>21.20<sup>a</sup></b>					

<sup>a</sup> Greenhouse Gas Emissions: The Energy Dimension, OECD/IEA, 1991, p. 64.

<sup>b</sup> Greenhouse Gas Emissions: The Energy Dimension, Tables E-1.a, E-2 and E-3, OECD/IEA, 1991, pp. 179-181.

<sup>c</sup> Environmental Biology, Altman Philip (de.), Bethesda: Federation of American Societies for Experimental Biology, 1966, p. 271.

<sup>d</sup> Authors calculation, Programa Universitario de Energía, UNAM, México, 1991.

<sup>e</sup> Magar, R., La Contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, *Dinámica*, J. Quintanilla y A. Rojas (eds.), Programa Universitario de Energía, UNAM, México, enero-febrero, 1991, p. 5.

<sup>f</sup> CFE, comunicación personal.

<sup>g</sup> Environmental Effects of Electricity Generation, OECD, París, 1985, pp.69-71.

## Evolución histórica y proyecciones de las emisiones de gases de invernadero asociadas a la generación eléctrica en México

Las emisiones que se reportan en los siguientes párrafos y figuras corresponden, únicamente, a aquellas provenientes del consumo energéti-

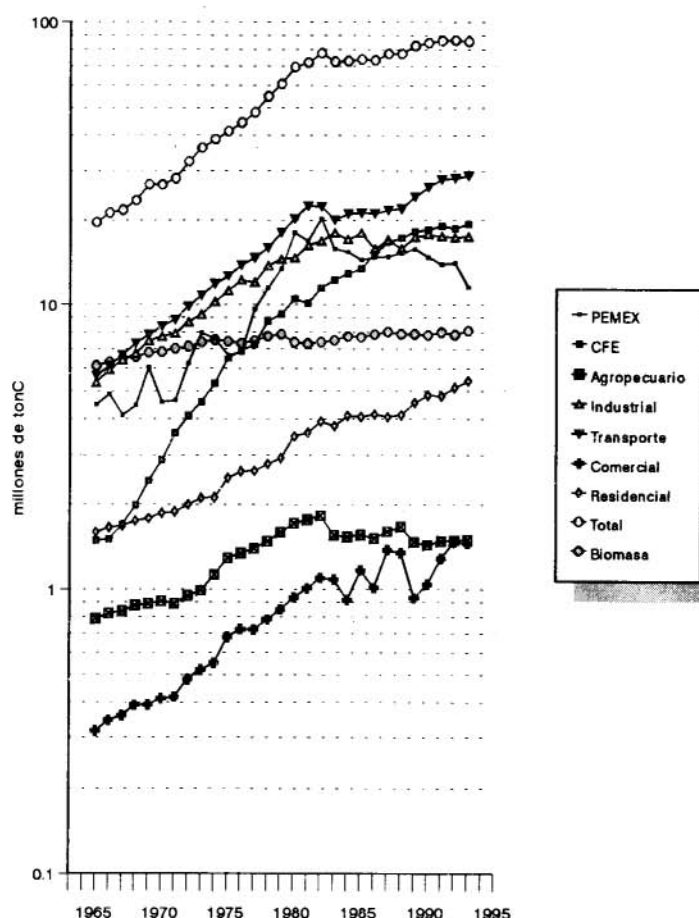
co para la generación eléctrica. Sólo con propósitos de comparación, incluiremos las emisiones de CO<sub>2</sub> para los sectores restantes, indicando que se cuenta con los resultados correspondientes para los sectores y subsectores, así como para los contaminantes mencionados en la descripción del modelo de demanda de energía. Por otra parte, y de acuerdo con la metodología del International Panel for Climate Change (IPCC), las emisiones de la biomasa como consumo energético (en el caso de México, las originadas por la quema de leña y bagazo de caña,) no se incluyen.

### • *Emisiones de CO<sub>2</sub>*

La Figura 16 muestra la estimación, basada en los Balances Nacionales de Energía (1965-1993) publicados por la SEMIP y por la Secretaría de Energía en 1994, de la evolución histórica de las emisiones de CO<sub>2</sub> para cada uno de los sectores considerados. Se observan tres períodos de comportamientos diferentes entre 1965 y 1994 (el primero de 1965 a 1982, el segundo de 1982 a 1989 y el tercero de 1989 a 1994).

El transporte es el contribuyente más importante a las emisiones totales de este contaminante, seguido por los sectores industrial, eléctrico, PEMEX, residencial, agropecuario y, por último el comercial. El sector público y de servicios no presenta consumo directo de combustibles fósiles (de acuerdo con el Balance Nacional de Energía sólo consume electricidad) y por ello no contribuye a las emisiones.

Considerando con detalle las emisiones del sector eléctrico, tanto históricas como sus proyecciones, la Figura 17 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con el consumo de combustibles fósiles. Los más importantes son el combustóleo, gas natural y carbón. En tanto que el más importante combustible fósil en este sector es el combustóleo y tomando en cuenta los factores de emisión asociados con este combustible (Tabla 3), una reducción en su uso tendría el efecto de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, en consecuencia, su sustitución -parcial o total por gas natural- constituiría una acción de mitigación que representa un reto para la CFE y PEMEX al requerirse una mayor disponibilidad de gas natural, tener excedentes de combustóleo, por ende qué hacer con él, y conversión de plantas de generación a plantas a base de gas natural. Acciones de mitigación como lo es la norma ecológica para fuentes fijas (NOM-085-ECOL-1994) tienen efectos positivos en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector, ya que, si bien no es éste el propósito central de la norma (su propósito es la reduc-



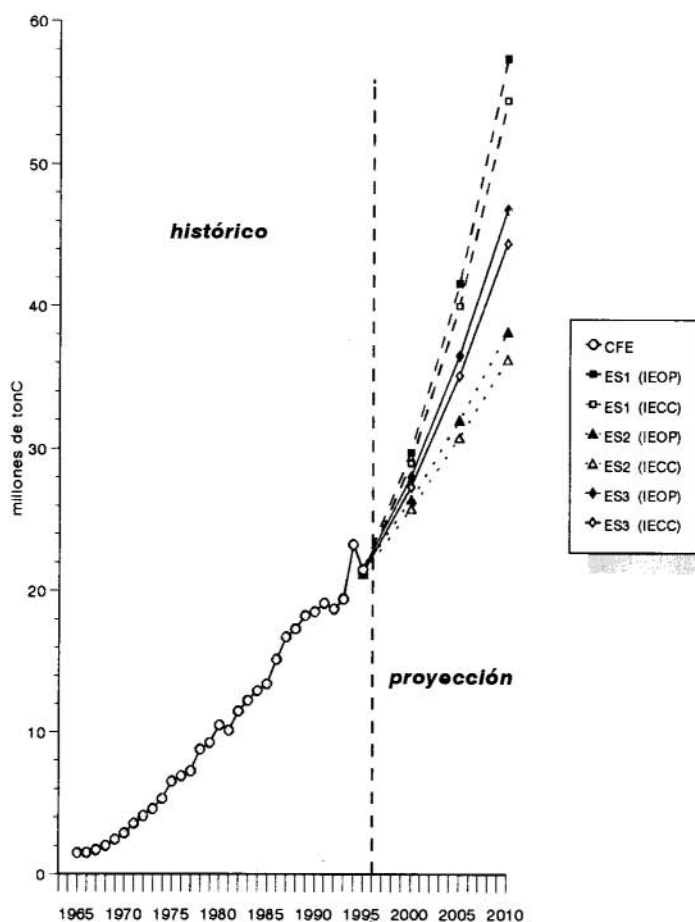
Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 16.** Contribución sectorial a las emisiones históricas de CO<sub>2</sub>, 1965-1993.

ción de emisiones de SO<sub>2</sub>, entre otras) si contribuye a la reducción al auspicar el uso de gas natural en lugar de combustóleo. Sin embargo, esta sustitución conlleva incrementos en las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO, reducciones en CO<sub>2</sub>, HC, partículas y una drástica reducción en SO<sub>x</sub>.

En cuanto a las proyecciones de las emisiones de CO<sub>2</sub>, de la Figura 17 se observa que este contaminante, en el período 1995-2010, duplicaría las emisiones, con respecto a su valor en 1990, entre 2003 y 2004 para el escenario de alto crecimiento económico (bajo cualquiera de las dos opcio-

nes para las intensidades energéticas); entre el 2006 y 2007 para el escenario de referencia y entre el 2010 y después para el escenario de bajo crecimiento económico. En las nuevas proyecciones que estamos preparando se tendrá en detalle los impactos de acciones como las mencionadas en líneas anteriores.



IECC: Intensidades Energéticas Constantes.

IEOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

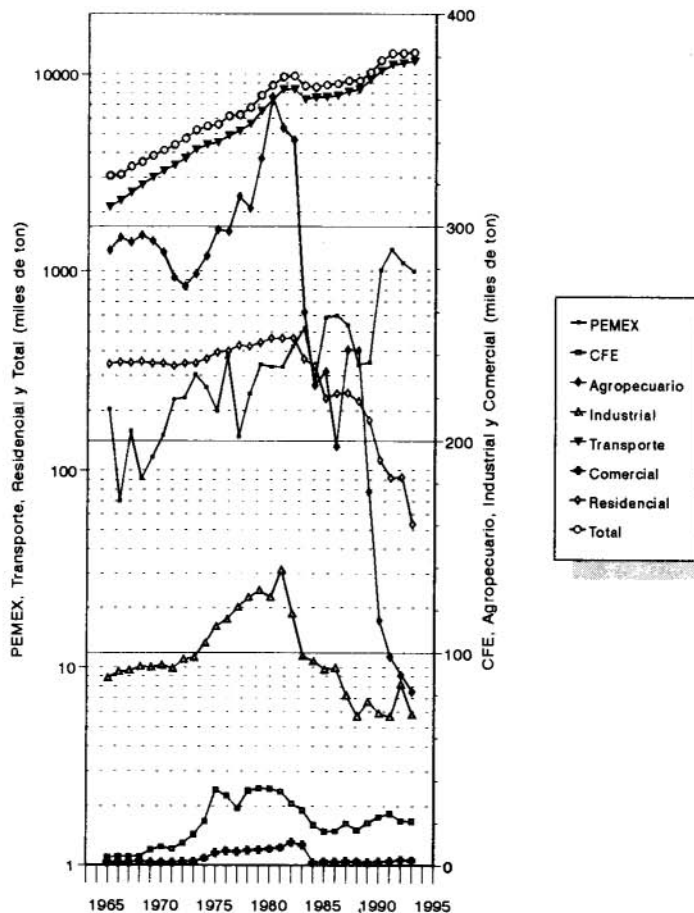
**Fuente:** Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 17.** Contribución del sector eléctrico a las emisiones de CO<sub>2</sub>, 1965-2010.



• **Emisiones de CO**

La Figura 18 muestra la situación, basada en los Balances Nacionales de Energía, de la evolución histórica de las emisiones de CO para cada uno de los sectores considerados. Al igual que en el caso precedente, se observan los mismos tres periodos a lo largo del intervalo 1965-1993. De nuevo, el transporte es el más importante contribuyente a las emisiones de CO, esta vez seguido por PEMEX y los sectores agropecuario y residencial. Muy por debajo los sectores eléctrico, industrial y comercial. En los últimos 15

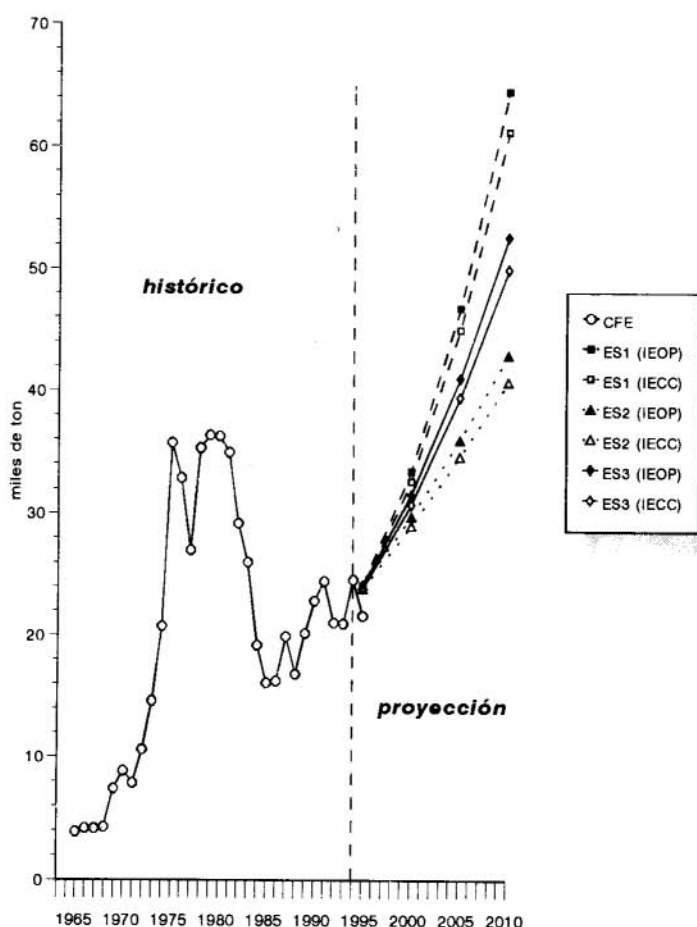


Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 18.** Contribución sectorial a las emisiones históricas de CO, 1965-1993.

años se observa una pérdida de importancia de los sectores industrial, agropecuario y comercial.

La Figura 19 muestra las emisiones históricas de CO, resultado de las actividades de generación eléctrica y las proyecciones para este contaminante en el sector. Se observa que la opción de opinión experta siempre



IECC: Intensidades Energéticas Constantes.

IEOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 19.** Contribución del sector eléctrico a las emisiones de CO, 1965-2010.

arroja valores más altos que la de intensidades constantes para las emisiones.

Las tasas de crecimiento promedio anual de este contaminante en el período 1995-2010 indica que se presentaría la duplicación de las emisiones (con respecto a su valor en 1990) entre 2004 y 2005 para el escenario de alto crecimiento económico (bajo cualquiera de las dos opciones para las intensidades energéticas); entre el 2007 y 2008 para el escenario de referencia y después del 2010 para el escenario de bajo crecimiento económico. De hecho, las emisiones totales muestran que los sectores más importantes son el transporte, el eléctrico, el comercial y el residencial. En cambio, para los sectores petrolero, industrial y agropecuario la situación es la opuesta. Ciertamente, desde el punto de vista de acciones de mitigación, algunos de los comentarios hechos en la sección correspondiente a las emisiones de CO<sub>2</sub> y para los combustibles en esa sección, se aplican a estos sectores con respecto a las emisiones de CO.

#### • *Emisiones de NO<sub>x</sub>*

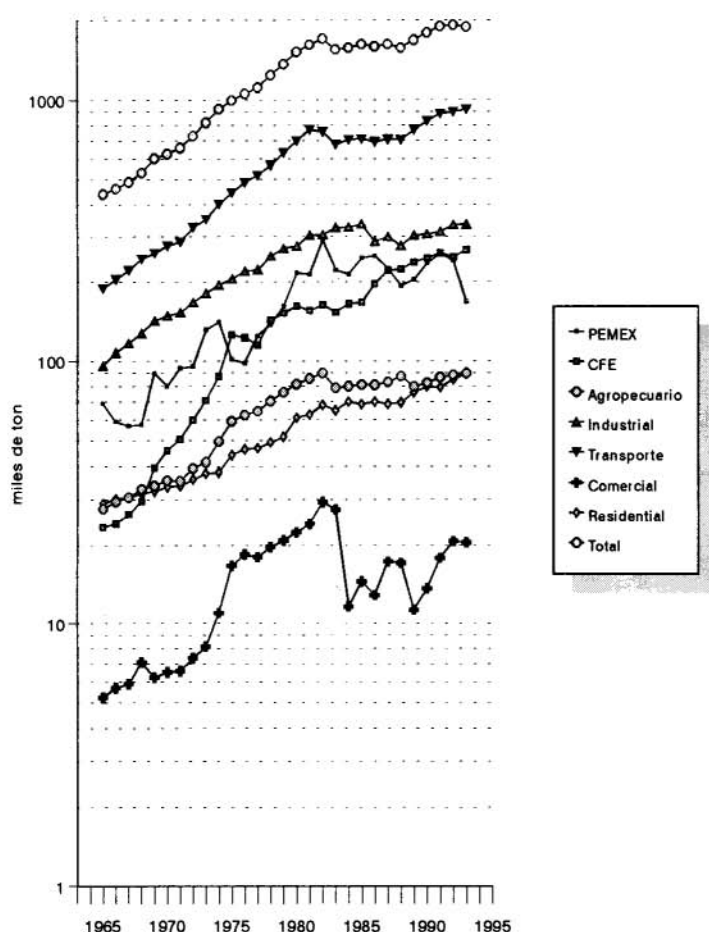
En este caso, la Figura 20 muestra la estimación, basada en los Balances Nacionales de Energía, de la evolución histórica de las emisiones de NO<sub>x</sub> para cada uno de los sectores considerados. Al igual que en los casos previos se observan tres períodos de comportamiento diferentes entre 1965 y 1993. Una vez más, el sector transporte es el principal contribuyente con cerca de dos veces la contribución del sector industrial, segundo en orden de importancia. Al industrial le siguen PEMEX y el sector eléctrico y bastante por debajo los sectores agropecuario, residencial y comercial.

Por lo que respecta a las emisiones históricas de NO<sub>x</sub> y las proyecciones para este contaminante provenientes de las actividades de generación eléctrica, la Figura 21 muestra que la opción de opinión experta siempre arroja valores más altos que la de intensidades energéticas constantes.

Las tasas de crecimiento promedio anual de este contaminante en el período 1995-2010 indican que se presentaría la duplicación de las emisiones (con respecto a su valor en 1990) entre 2003 y 2004 para el escenario de alto crecimiento económico (bajo cualquiera de las dos opciones para las intensidades energéticas); entre el 2006 y 2007 para el escenario de referencia y entre el 2010 y después para el escenario de bajo crecimiento económico.

Es importante hacer notar que las emisiones para los sectores trans-

porte, eléctrico, comercial y residencial siguen este patrón. En cambio, para los sectores petrolero, industrial y agropecuario la situación es la opuesta, esto es, los resultados para la opción de opinión experta quedan por debajo de la de intensidades energéticas constantes, indicando que las acciones de eficiencia energética coadyuvan a la reducción de gases de invernadero, sin embargo, al igual que con los otros contaminantes serán necesarias otras medidas tecnológicas, normativas y de política energética para contener con el problema.

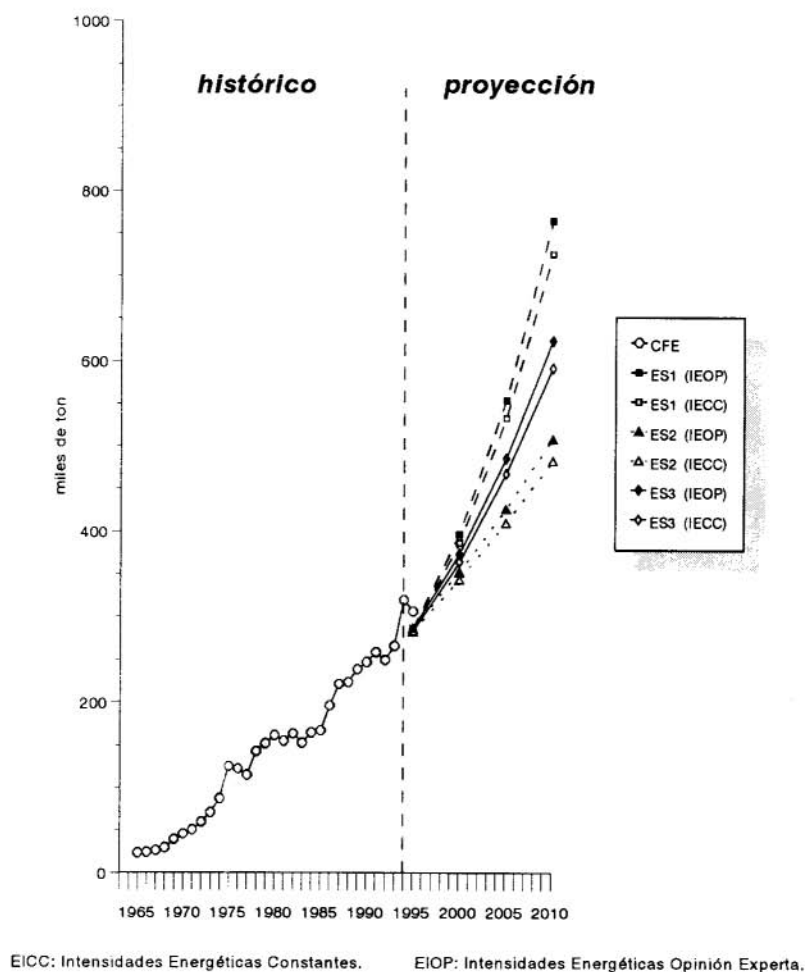


Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 20.** Contribución sectorial a las emisiones históricas de  $\text{NO}_x$ , 1965-1993.

• **Emisiones de HC**

La Figura 22 muestra los resultados para las emisiones históricas de los diferentes sectores. Se observa que el principal contribuyente a las emisiones de este contaminante es el sector transporte, seguido por el sector

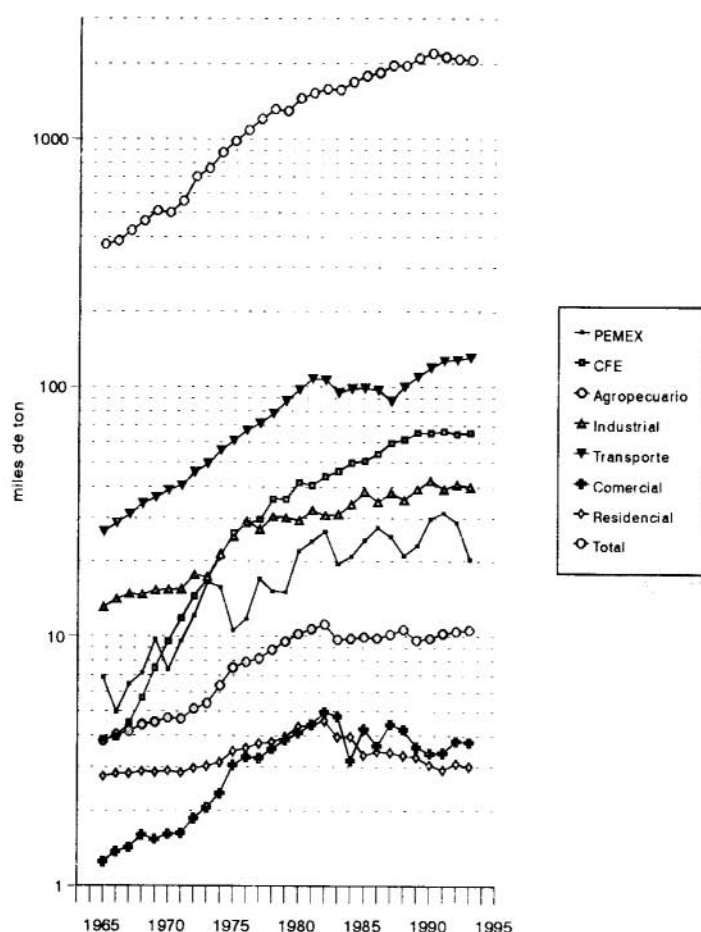


Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 21.** Contribución del sector eléctrico a las emisiones de NO<sub>x</sub>, 1965-2010.

eléctrico y el industrial en tercer lugar. En el caso de PEMEX se observa un comportamiento oscilatorio, sin embargo con una tendencia creciente. Los sectores agropecuario, comercial y residencial se ubican por debajo de este último con una contribución relativamente pequeña.

En este caso, al igual que en el caso de los  $\text{NO}_x$ , las proyecciones correspondientes a la opción de opinión experta siempre arrojan valores más altos, que la de intensidades energéticas constantes, para las emisiones globales de los sectores transporte, eléctrico, comercial y residencial.

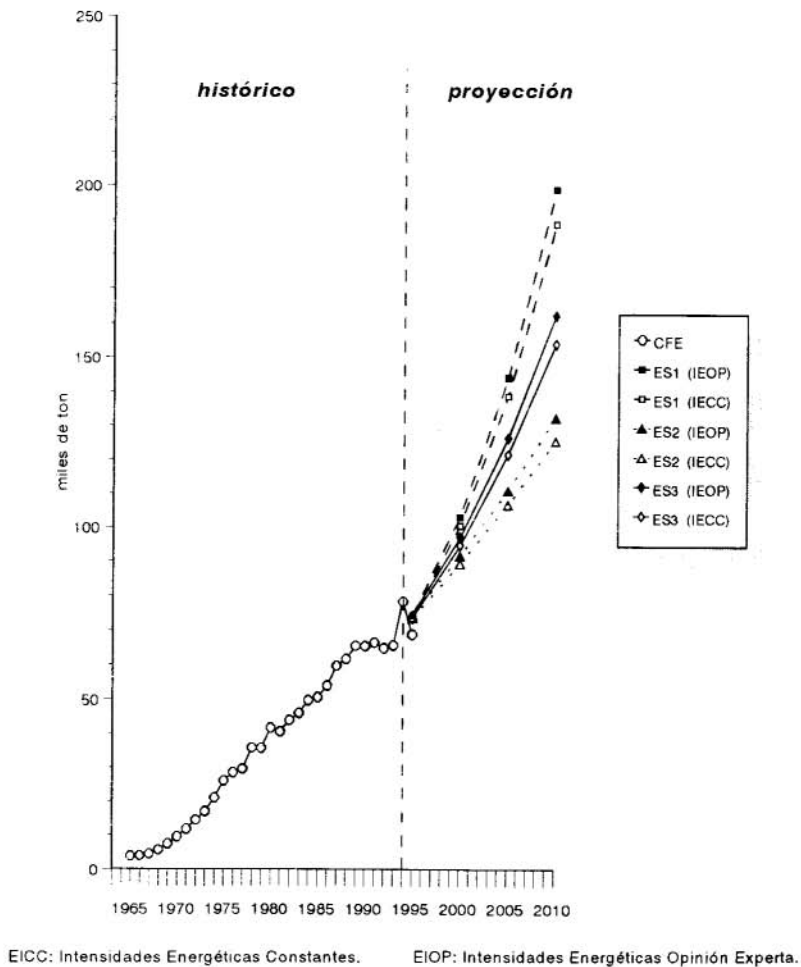


Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 22.** Contribución sectorial a las emisiones históricas de HC, 1965-1993.

En cambio, para los sectores petrolero, industrial y agropecuario la situación es la opuesta. De nuevo las acciones de eficiencia energética coadyuvan en la reducción de las emisiones.

En cuanto al sector eléctrico, la Figura 23 muestra las emisiones históricas totales del sector y las proyecciones para este contaminante. Las



Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 23.** Contribución del sector eléctrico a las emisiones de HC, 1965-2010.



tasas de crecimiento promedio anual de este contaminante en el período 1995-2010 indican que se presentaría la duplicación de las emisiones (con respecto a su valor en 1990) entre 2003 y 2004 para el escenario de alto crecimiento económico (bajo cualquiera de las dos opciones para las intensidades energéticas); entre el 2006 y 2007 para el escenario de referencia y entre el 2010 y después para el escenario de bajo crecimiento económico. Ciertamente, los comentarios y sugerencias presentados en la sección correspondiente a las emisiones de CO<sub>2</sub> y los combustibles en esa sección, se aplican a los sectores con respecto a las emisiones de HC.

#### • *Emisiones de partículas*

La Figura 24 muestra los resultados para evolución histórica de las emisiones, basados en los Balances Nacionales de Energía, para cada uno de los sectores considerados. De nuevo se observan los tres períodos de comportamiento mencionados.

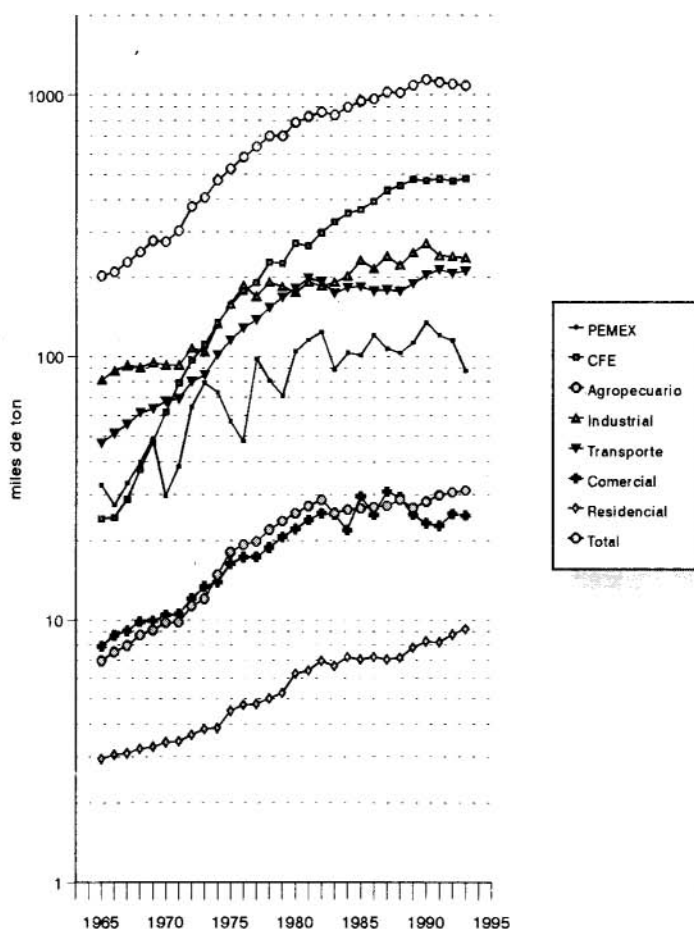
En este caso, el principal contribuyente a las emisiones es el sector eléctrico seguido del industrial y el transporte. De nuevo, PEMEX muestra un comportamiento oscilatorio con una tendencia creciente, excepto por un cambio de tendencia en los últimos años. Los sectores agropecuario y comercial muestran un comportamiento más o menos parejo, alternando niveles de contribución a lo largo del período. Sin embargo, al parecer el sector agropecuario se ubica de manera ostensible por encima a partir de 1989.

El sector residencial muestra un comportamiento sistemáticamente creciente y relativamente menor en comparación con el agropecuario. Por otra parte, se observa una estabilización en las emisiones del sector eléctrico en el lapso 1989-1993 con un incremento notable en 1994 para luego caer en 1995, como resultado de la crisis de fines de 1994.

En cuanto al sector eléctrico, la Figura 25 muestra la evolución histórica de las emisiones y las proyecciones para este contaminante. Se observan las mismas conclusiones que para otros contaminantes, esto es, la opción de opinión experta se ubica por encima de la de intensidades constantes para los sectores transporte, eléctrico, comercial y residencial. Lo opuesto ocurre con los sectores petrolero, industrial y agropecuario.

Las tasas de crecimiento promedio anual de este contaminante en el período 1995-2010 indican que se presentaría la duplicación de las emisiones (con respecto a su valor en 1990) entre 2003 y 2004 para el escenario

de alto crecimiento económico (bajo cualquiera de las dos opciones para las intensidades energéticas); entre el 2005 y 2006 para el escenario de referencia y entre el 2010 y después para el escenario de bajo crecimiento económico. Ciertamente, los comentarios y sugerencias presentados en la sección correspondiente a las emisiones de CO<sub>2</sub> y los combustibles en esa sección, se aplican a los sectores con respecto a las emisiones de partículas.

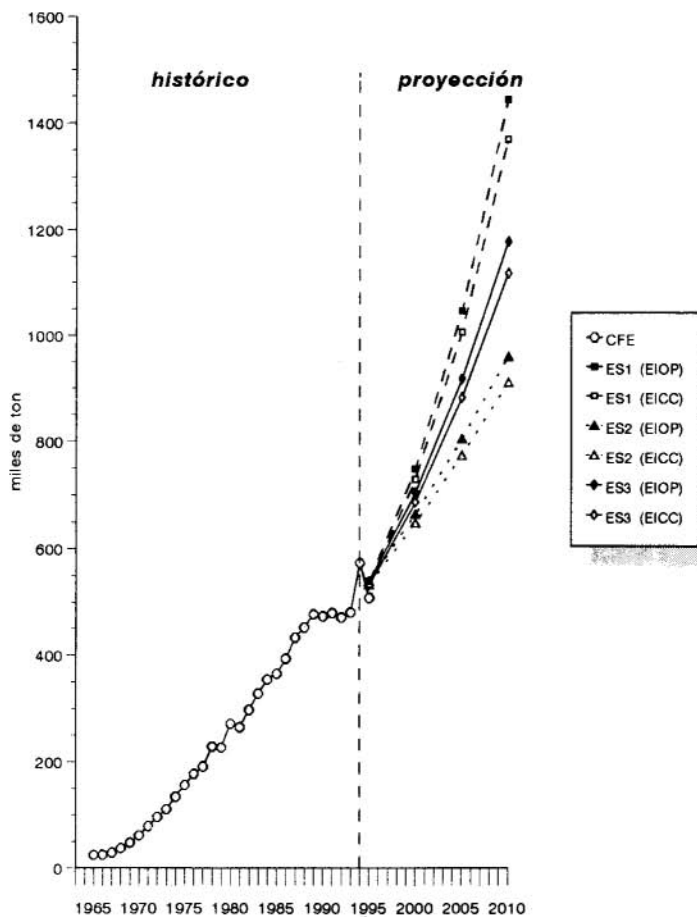


Fuente: JOM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 24.** Contribución sectorial a las emisiones históricas de partículas, 1965-1993.

### • Emisiones de $SO_x$

En este caso, la Figura 26 muestra los resultados para este contaminante a lo largo del período 1965-1993. Se observa que los sectores eléctri-



EICC: Intensidades Energéticas Constantes.

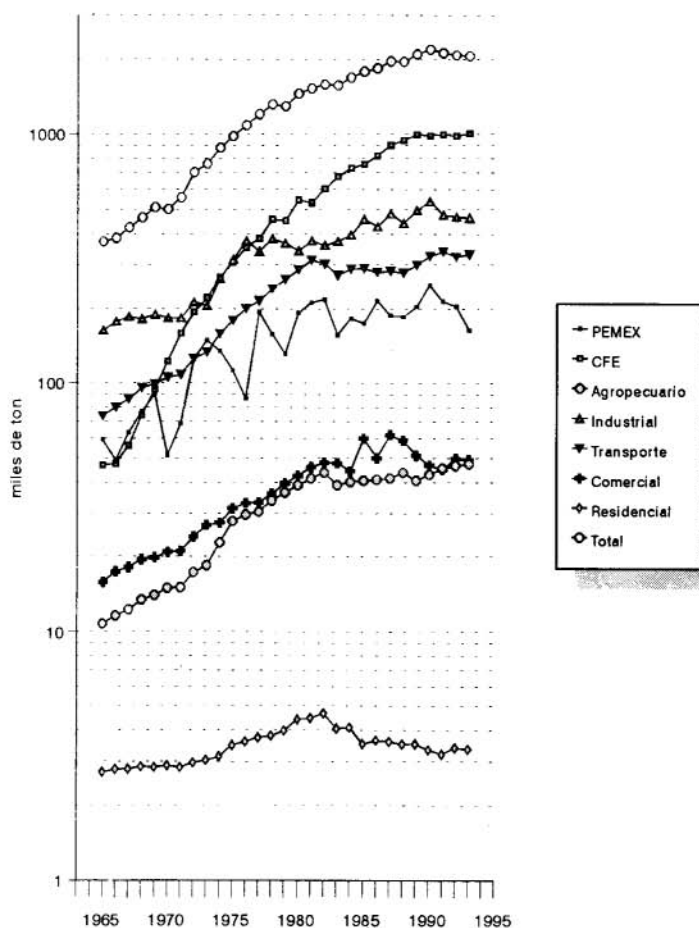
EIOP: Intensidades Energéticas Opinión Experta.

Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 25.** Contribución del sector eléctrico a las emisiones de partículas, 1965-2010.

co e industrial son los principales emisores seguidos por el transporte. El sector petrolero muestra un comportamiento análogo al presentado en otros contaminantes e incluso la tendencia creciente comentada en párrafos anteriores. Los sectores agropecuario y comercial muestran un comportamiento más o menos parejo, el agropecuario siempre por debajo. El sector residencial presenta una contribución relativamente pequeña.

Con mucho, las contribuciones de los sectores eléctrico e industrial dominan el panorama y de ahí que la norma NOM-085- ECOL-1994 tenga



Fuente: JQM, preparada con base en las Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1965-1996.

**Figura 26.** Contribución sectorial a las emisiones históricas de  $\text{SO}_x$ , 1965-1993.

como objetivo definido estos sectores. Sin embargo, se observa que en los últimos años el sector transporte aporta una cantidad comparable, más o menos la mitad, a las emisiones del sector industrial. Por ello es de esperarse y recomendarse acciones de normalización para las emisiones de este contaminante en el sector transporte y con ello en la calidad de los combustibles, específicamente en sus contenidos de azufre.

Finalmente, la Figura 27 muestra las emisiones históricas y las proyecciones para los  $\text{SO}_x$  provenientes de las actividades de generación eléctrica. Se observan las mismas conclusiones que para otros contaminantes, esto es, la opción de opinión experta se ubica por encima de la de intensidades constantes para los sectores transporte, eléctrico, comercial y residencial. Lo opuesto ocurre con los sectores petrolero, industrial y agropecuario.

En cuanto a las tasas de crecimiento promedio anual de este contaminante en el período 1995-2010 indican que se presentaría la duplicación de las emisiones (con respecto a su valor en 1990) entre 2004 y 2005 para el escenario de alto crecimiento económico (bajo cualquiera de las dos opciones para las intensidades energéticas); entre el 2006 y 2007 para el escenario de referencia y entre el 2010 y después para el escenario de bajo crecimiento económico. Ciertamente, los comentarios y sugerencias presentados en la sección correspondiente a las emisiones de  $\text{CO}_2$  y los combustibles en esa sección, se aplican a los sectores con respecto a las emisiones de partículas.

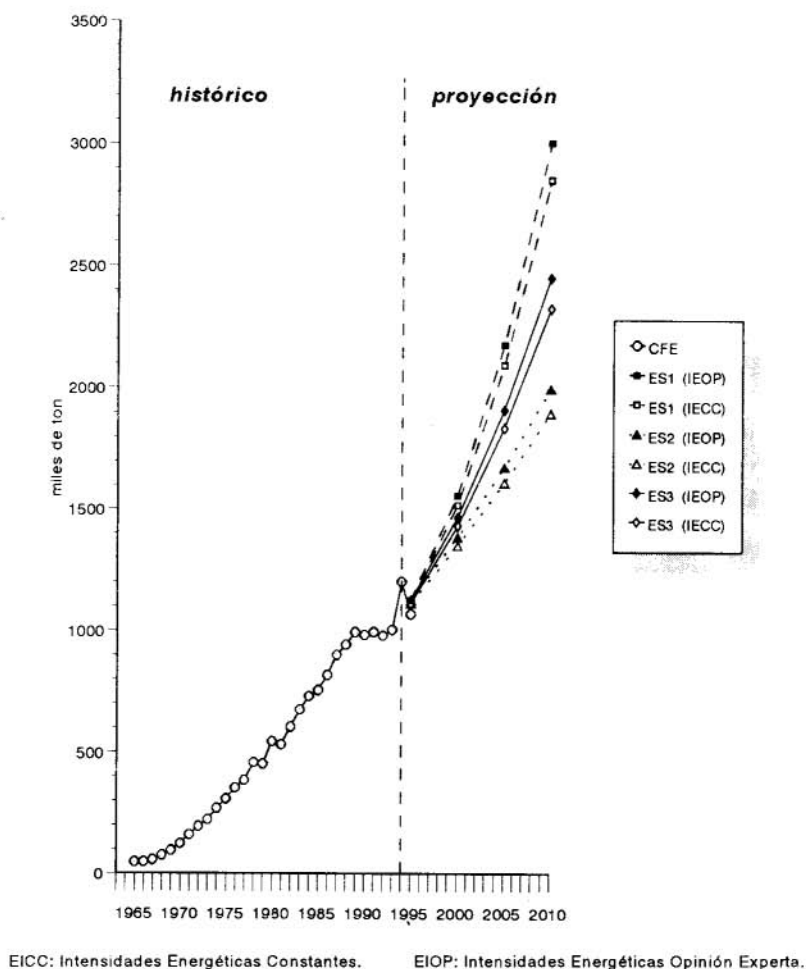
### **Tecnologías energéticas y ambientales para la reducción y/o eliminación de contaminantes en la generación eléctrica**

Como hemos podido notar en las secciones anteriores, la electricidad representa una porción creciente de la demanda de energía final en el país y, es de esperarse que en el futuro la tendencia se incremente. Dado que una gran parte de la infraestructura de generación es a base de combustibles fósiles, también es de esperarse que la generación eléctrica continúe siendo una grande y creciente fuente de emisiones de  $\text{CO}_2$  (actualmente, el sector eléctrico representa poco más del 30 por ciento de las emisiones totales del sistema energético mexicano). Asimismo, la generación eléctrica es responsable de otros gases de invernadero, particularmente  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_x$  provenientes de los procesos de combustión.

Cuando uno considera las opciones tecnológicas para la reducción

de emisiones de gases de invernadero, es posible o conveniente enfocar el problema bajo tres grandes puntos de vista:

1. Mejorar la eficiencia de las tecnologías de generación con combustibles fósiles, en el mejor de los casos minimizando las emisio-



Fuente: Proyecciones de demanda de energía y emisiones relacionadas, Quintanilla, J. y M. Bauer, PUE-UNAM.

**Figura 27.** Contribución del sector eléctrico a las emisiones de SO<sub>x</sub>, 1965-2010.

nes pero no eliminándolas;

2. Incrementando la participación en la generación de tecnologías que no empleen combustibles fósiles (por ejemplo, fuentes renovables de energía, energía nuclear); y,
3. Desarrollar tecnología al final del tubo para la captura y disposición de las emisiones de plantas de generación a base de combustibles fósiles.

Desde luego que el nivel de demanda y, con ello de las emisiones de gases de invernadero, provenientes de los sistemas eléctricos pueden ser reducidos a través de las mejoras en la eficiencia con que es usada la electricidad. Estas tecnologías de uso final de la electricidad son importantes, sin embargo dado el alcance del presente trabajo no serán discutidas o comentadas aquí, únicamente referimos al lector a la literatura disponible. Otro aspecto importante consiste en las prácticas de gestión o administración de la energía, las cuales juegan un papel importante en la mejora de la eficiencia energética y en la reducción de la demanda de combustibles fósiles. En este aspecto ya hemos comentado con un poco de detalle acciones tales como sustitución de combustibles; marcos regulatorios claros, flexibles y transparentes; estándares adecuados, etcétera.

A continuación analizaremos, brevemente, algunos de los posibles desarrollos tecnológicos para generación de energía eléctrica con combustibles fósiles, combustibles nucleares y fuentes renovables. En el proceso se incluirán aspectos relacionados con los posibles desarrollos en la transmisión eléctrica, lo cual acarrearía abatimientos en las emisiones a través de la reducción en las pérdidas de transmisión y la accesibilidad a fuentes renovables alejadas.

• ***Tecnologías para generación mejorada y avanzada con combustibles fósiles***

En cuanto al primero de estos puntos de vista, esto es, generación mejorada y avanzada a base de combustibles fósiles, estas se encuentran disponibles, sin embargo, el nivel con que ellas se empleen y difundan depende de la edad del parque existente, de los planes y programas de expansión y, desde luego, de los precios relativos de los combustibles fósiles. Se puede decir que el sistema eléctrico mexicano está dominado por tecnologías convencionales de generación y que la eficiencia del sistema se ubi-

ca entre 32 y 35 por ciento.

Los nuevos desarrollos tecnológicos se enfocan hacia tecnologías con eficiencias más altas, con costos por unidad de generación más reducidos y reducción de emisiones. Al parecer la tendencia es a alejarse del ciclo Rankine (turbina de vapor) e ir hacia ciclos combinados (del tipo Brayton (turbinas de gas) y ciclo Rankine), sin embargo, en la literatura se mencionan posibles mejoras futuras en los ciclos sencillos. En el corto plazo, se espera que penetren ampliamente las plantas de generación de ciclo combinado con turbina de gas. Estas reducen significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>, en parte porque son más eficientes y porque consumen gas natural, el cual tiene una intensidad de carbono más baja que el combustóleo y carbón (Tabla 3). Sin embargo, existen tecnologías basadas en carbón altamente eficientes (por ejemplo, lecho fluidizado circulante) o que se encuentran en proceso de demostración a grande escala (gasificación y ciclo combinado integrados). Estas tecnologías están disponibles en nuevas plantas, en algunos casos como opción de renovación de plantas existentes y reemplazar alguna etapa de la combustión de un combustible.

Es importante mencionar que los comentarios que haremos se enfocan, principalmente, a las tecnologías de generación eléctrica que mejoran la eficiencia con la que los combustibles fósiles son convertidos en energía eléctrica y que ello resulta en reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Reducciones en otros contaminantes son más difíciles de evaluar, por ejemplo N<sub>2</sub>O, y requieren de mayor estudio.

La Tabla 4 muestra las tecnologías para generación eléctrica que se estima estarán disponibles en el corto, mediano y largo plazos. Como se podrá apreciar de los párrafos previos, los cambios de la tecnología de producción de electricidad, en particular en el caso del carbón, están siendo cada vez más motivados por la necesidad de reducir los costos que implica satisfacer los crecientes requisitos ambientales. De hecho los criterios ambientales reciben niveles de importancia altos, tan altos o más que los de eficiencia térmica y fiabilidad de las centrales.

En cuanto a las centrales convencionales alimentadas con combustibles fósiles las preocupaciones ambientales han originado la modernización de centrales térmicas existentes mediante la instalación de dispositivos de filtración para desulfurización y desnitrificación. Sin embargo, se presentan pérdidas de rendimiento y se considera que éstas podrían ser compensadas mediante el cambio de procesos de vapor subcrítico a procesos supercríticos y ultra-supercríticos.



**Tabla 4**

**Opciones tecnológicas**

	<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b> (< 2010)	<b>Largo plazo</b> (> 2010)
<b>Combustibles fósiles</b>			
• Turbina de gas	x	x	x
• Ciclos combinados	x	x	x
• Caldera fósil	x	x	x
• Caldera fósil avanzada		x	x
• Lecho fluidizado a presión		x	x
• Lecho fluidizado a presión atmosférica	x	x	x
• Gasificación de carbón ciclo combinado	x	x	x
• Celda de combustible			x
• Gasificación directa celda de combustible			x
• Combustión directa ciclo combinado			x
• Gasificación híbrido a base de lecho fluidizado a presión			x
• Ciclo binario Rankine		x	x
• Magnetohidrodinámica			x
<b>Nuclear</b>			
• Reactor de agua ligera (LWR) convencional	x	x	x
• Reactor de agua ligera (LWR) avanzado		x	x
• Reactor de agua pesada a presión (PHWR) convencional		x	x
• Reactor de agua pesada a presión (PHWR) avanzado		x	x
• Reactor refrigerado por gas		x	x
• Reactor reproductor rápido		x	x
<b>Hidroeléctrica</b>			
• Gran potencia	x	x	x
• Pequeña potencia	x	x	x
<b>Geotermia</b>			
• Convencional	x	x	x
• Binario	x	x	x
• Roca caliente seca		x	x
• Geopresurizada		x	x
• Magma			x
<b>Eólica</b>			
• Terrestre		x	x
• Marina			x

(Continuación Tabla 4)

### Solar

• Torre solar (térmica)		x	x
• Parabólica de un solo paso (térmica)	x	x	x
• Disco parabólico/ciclo Sterling (térmica)		x	x
• Fotovoltáico a base de cristal		x	x
• Fotovoltáico amorfo			x
• Fotovoltáica de película delgada			x
• Concentradores fotovoltáicos		x	x

### Biomasa

• Desechos de recolección	x	x	x
• Cultivos energéticos		x	x

### Residuos urbanos

• Gas de vertedero			x
• Combustión	x	x	x

### Olas

• En tierra		x	x
• En mar			x

### • Maremotriz

• Mareotérmica (Conversión de energía térmica oceánica)			x
---	--	--	---

Fuente: Preparada en base a información del Simposio de Expertos Superiores sobre Electricidad y Medio Ambiente, Helsinki, Finlandia, 1991.

Las centrales supercríticas, en Europa, Japón y Estados Unidos, han mostrado mejoras en el rendimiento del orden del ocho por ciento en comparación con las centrales convencionales de carbón pulverizado. En el caso de las ultra-supercríticas la tecnología ha permanecido a nivel de demostración debido a que los mayores costos de inversión de estas centrales exceden los ahorros en costos de operación resultantes de un rendimiento mejorado. De cualquier manera se espera que en el futuro logren mayores rendimientos y con ello costos competitivos.

Para estos propósitos, dos aspectos de aplicación en centrales convencionales son la modernización y la renovación. La modernización de centrales puede incluir tecnologías para la precombustión, combustión y

postcombustión de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y otros, sin embargo, ella no contribuye a reducir las emisiones de dióxido de carbono e, incluso, puede dar lugar a mayores emisiones de este contaminante debido a la degradación de la eficiencia.

La renovación de centrales permite: extender la vida de las mismas, mejorar la eficiencia, incrementar la flexibilidad en el uso de combustibles, mejorar la fiabilidad y disponibilidad, reducir costos de explotación, mantenimiento y de combustibles, así como de contaminación por unidad de electricidad producida. La modificación de la potencia, por lo general, es a través de conversión de calderas a sistemas en lecho fluidizado, presurizado o a presión atmosférica, sin embargo, en otros casos se incorporan unidades de ciclo combinado de gas natural o ciclos con gas natural inicial.

En el caso de la combustión en lecho fluidizado el control de la contaminación se realiza durante el proceso de combustión. La opción de lecho fluidizado a presión atmosférica ha pasado la etapa de demostración y la de lecho fluidizado a presión se considera prometedora. La primera permite la combustión de una mayor variedad de carbones y combustibles de menor calidad de lo que es posible en centrales convencionales. Las características de la tecnología permiten reducciones de óxidos de nitrógeno y la caliza presente reduce las emisiones de dióxido de azufre, sin embargo la adición de la caliza produce incrementos en la producción de dióxido de carbono, todo ello en comparación con las carboeléctricas convencionales. Otro efecto es que se mejora el rendimiento de conversión en aproximadamente el ocho por ciento. De hecho, aún se requiere resolver algunos problemas técnicos (configuración satisfactoria de la central y limpieza de los gases de combustión) para que su instalación se generalice.

Las turbinas de gas se emplean, por lo general, para satisfacer cargas intermedias y de pico. Estas tienen bajas emisiones de precursores de lluvia ácida y emisiones moderadas de gases de invernadero. Por lo que respecta a las de ciclo combinado sin encendido, la electricidad es producida por una turbina de gas y luego mediante la producción de vapor a partir del gas de escape de la turbina de gas, para mover la turbina de vapor. Al captar el calor contenido en los gases de escape se incrementa el rendimiento total. El combustible es generalmente gas natural (ciclo combinado convencional), aunque puede utilizarse gas de poder calorífico medio producido por la gasificación del carbón. Los bajos costos de capital y el alto rendimiento hacen que el ciclo combinado con gas natural sea una opción de

producción comercial atractiva. Algunos estudios indican que los rendimientos de conversión de ciclo combinado evolucionarán de entre 50 y 52 por ciento al año 2000 a valores de entre 52 a 55 por ciento entre el 2000 y el 2010 para ubicarse en el intervalo de 55 a 57 por ciento entre el 2010 y el 2020.

La gasificación de carbón con ciclo combinado ha sido demostrada comercialmente. La sustitución del gas natural por gas derivado del carbón también ha sido demostrada sin embargo, la tecnología no se ha extendido debido a los costos de capital relativamente altos de la planta de gasificación. Las eficiencias actuales se sitúan en el orden del 40 por ciento, sin embargo, es posible incrementar la eficiencia a través de Investigación y Desarrollo en algunas de las componentes de la tecnología, específicamente en la turbina de gas (mejora de materiales que permitan incrementar la temperatura de los gases de entrada) y en el paso de limpieza de los gases calientes (mantener la temperatura de los gases de salida del gasificador en lugar de pre-enfriarlos antes de limpiarlos). Se espera que estas mejoras den lugar a incrementos en la eficiencia del sistema de valores del 43 por ciento al 47 por ciento para el año 2010 y hasta el 50 por ciento para el 2025.

La opción combustión directa del carbón ciclo combinado ofrece el potencial de incrementar la eficiencia de la generación eléctrica a partir de carbón por medio de la alimentación directa de la energía liberada de la combustión del carbón en un ciclo combinado. Se tienen problemas con las partículas resultantes de la combustión del carbón, las cuales pueden dañar la turbina de gas.

En cuanto a estos posibles problemas se están estudiando dos opciones que, en principio, permiten reducir el daño potencial. El primero involucra el uso de intercambiadores de calor avanzados que transfieran la energía de la combustión del carbón a un fluido de trabajo de una turbina de gas. Sin embargo, este método deberá proporcionar respuesta a los daños potenciales a los intercambiadores de calor. El segundo y más directo método involucra una cámara de combustión avanzada que separe la materia particulada de los gases de combustión antes de que entren a la turbina de gas. Se considera que el rendimiento podría ubicarse en el orden del 48 al 52 por ciento entre el 2010 y el 2020 y se espera que el rendimiento sea menor que el ciclo combinado con gas natural, pero mayor al de ciclo combinado con gasificación de carbón.

En una planta de vapor convencional actual se opera con vapor sub-

crítico a presiones de 15 a 18 Mpa y temperaturas entre 510 y 540 °C. Para los ciclos de vapor supercríticos (25 Mpa) se ha probado que se tienen incrementos en la eficiencia de generación y que incrementos importantes en la eficiencia de generación se pueden alcanzar llevando las condiciones del vapor a lo que se conoce como condiciones ultra-supercríticas (30 Mpa) si se cuenta con la tecnología de materiales apropiada. Se estima que operando a tales condiciones se podría incrementar la eficiencia de plantas de carbón con ciclo de vapor (equipadas con desulfurizador) a valores del orden del 45 por ciento comparado con un 35 a 37 por ciento de plantas convencionales subcríticas sin equipo desulfurizador.

Por lo que respecta a los ciclos híbridos, éstos son una combinación de lecho fluidizado y tecnologías de gasificación que proporcionan un sistema con eficiencias de generación eléctrica mayores a las tecnologías individuales. Las estimaciones reportadas en la literatura indican que se podrían alcanzar eficiencias del 44 por ciento para el 2005, de 46 por ciento para el 2010 y de 52 por ciento para el 2025. En este caso se requiere de los desarrollos mencionados en turbinas de gas y tecnologías para limpieza de gases calientes.

Otra posible tecnología es la denominada ciclo Kalina, el cual, a diferencia del ciclo Rankine, hace uso de dos o más fluidos de trabajo. De acuerdo a la literatura sobre el tema se considera que el único cambio significativo que se requeriría hacer a una planta de generación convencional es en el proceso de condensación, ya que se requiere de un sistema que cambie la composición del fluido antes y después de la condensación. Asimismo, se indican importantes incrementos en la eficiencia del sistema (del orden del 10 por ciento o más) como consecuencia del diseño específico del ciclo al sistema bajo consideración.

En la turbina de aire húmedo, se mezcla agua tibia con aire del compresor de la turbina de gas. El proceso usa el calor de los gases de escape de la turbina de gas de dos maneras: primero, en un recuperador y segundo, en un saturador. Cuando este ciclo es integrado con gasificación se espera que el rendimiento total sea ligeramente mayor que el de una central de gasificación de carbón ciclo combinado convencional. Sin embargo, para que esto opere eficientemente, será necesario desarrollar nuevos tipos de turbinas, en especial turbinas de aire húmedo.

Todos los ciclos que hemos mencionado en los últimos párrafos se ubican, de manera natural, en lo que se suele denominar bajo el rubro de conceptos de ciclo avanzado, entendiéndose por esto último la extensión del

ciclo combinado, donde el papel del vapor se reduce progresivamente, en el cual la componente turbina de vapor se elimina completamente.

Otro ciclo avanzado con potencial de muy alta eficiencia para carbón es el ciclo Rankine binario. Este proceso combina un ciclo de vapor de potasio a alta temperatura y un ciclo inferior de vapor. Aún cuando los estudios indican que este tipo de central se podría construir sin grandes riesgos técnicos sus costos de capital son muy altos o muy inciertos. De hecho se estima que los rendimientos se podrían ubicar en el intervalo del 48 al 52 por ciento para el año 2020. Sin embargo, ellos podrían jugar un papel desde el punto de vista económico si pueden estar disponibles antes que las celdas de combustible, las cuales es probable que sean aún más eficientes.

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten energía de reacciones químicas directamente en energía eléctrica. Se distingue entre ellas por el tipo de electrolito empleado y las temperaturas de operación varían entre los 80 y 1000 °C. Se considera que el uso de celdas de combustible de alta temperatura en combinación con ciclos combinados da lugar a más altas eficiencias de generación eléctrica. Asimismo, se estima que pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 40 por ciento comparadas con centrales convencionales. Es claro que se requiere un importante esfuerzo de Investigación y Desarrollo en muy diversas áreas del proceso y dispositivo, sin embargo, se estima que una celda de combustible alimentada con gas natural puede estar disponible para el 2025 con una eficiencia de hasta 60 por ciento y de 65 por ciento para el 2040.

Para finalizar con las tecnologías a base de combustibles fósiles pasemos a comentar, brevemente la magnetohidrodinámica. Este tipo de central es o constituye un diseño de primera generación, de ciclo abierto, alta temperatura y aire enriquecido que produce electricidad directamente del gas caliente (2 500 °C) que fluye a través de un campo magnético. Se emplea una semilla de carbonato de potasio para lograr la conductividad eléctrica requerida del gas ionizado. De hecho, la naturaleza severa del régimen de alta temperatura requerida por la tecnología en cuestión es lo que impide su aplicación práctica. En otras palabras, el factor clave para la utilización de esta tecnología se ubica en la disponibilidad y/o desarrollo de materiales que soporten estas altas temperaturas, pero esto no es privativo de esta tecnología, de hecho, este factor es compartido por algunas de las opciones tecnológicas discutidas.

Como podrá observarse de los comentarios que hemos hecho en pá-

rrafos anteriores, buena parte de los esfuerzos de desarrollo tecnológico a futuro se han orientado hacia lo que se podría denominar un Programa tecnológico de carbón limpio. En la mayor parte de los países europeos el desarrollo tecnológico se orienta a combustión en lecho fluidizado circulante, combustión en lecho fluidizado presurizado, gasificación integrada ciclo combinado. La otra área que está siendo fuertemente apoyada se ubica en las celdas de combustible de alta temperatura y proyectos de demostración específicos. Por lo que respecta al Japón, la Investigación y Desarrollo se ubica en áreas tales como ciclos de vapor, combustión lecho fluidizado, gasificación de carbón, magnetohidrodinámica y turbinas de gas. El programa Sunshine japonés incluye gasificación de bajo poder calorífico, celdas de combustible y el desarrollo de turbinas de gas de alta eficiencia a base de cerámicos. En los Estados Unidos tienen el Programa de tecnología limpia a base de carbón, el cual es financiado por el gobierno y la industria. El programa incluye proyectos en combustión en lecho fluidizado y en gasificación integrada ciclo combinado, así como celdas de combustible, alimentación indirecta de carbón ciclo combinado y máquinas diesel alimentadas con carbón. Como se puede observar hay una fuerte tendencia hacia el aprovechamiento futuro del carbón.

En el caso de México, la aplicación de estas posibles opciones dependerá de muchos factores, entre otros, dependerá de la calidad de los combustibles disponibles, de los recursos naturales disponibles, etcétera. Por ejemplo, las plantas de ciclo combinado con turbina de gas pueden lidiar con variaciones en la calidad del gas suministrado, en cambio, las celdas de combustible son, por el momento, intolerantes a gas con altos contenidos de azufre. En el caso de sistemas integrados de gasificación ciclo combinado y otras tecnologías a base de carbón son capaces de manejar combustibles de calidad variable e incluso de calidad pobre.

### ***Tecnologías nucleares para generación eléctrica***

Las plantas nucleares existentes están basadas en cuatro tecnologías de reactores. Por una parte se tienen los reactores de agua ligera en sus dos modalidades, presurizados y de ebullición. La tercera versión, esto es, los CANDU son reactores presurizados que emplean agua pesada y la cuarta tecnología la forman los enfriados por gas.

Las emisiones de gases de invernadero resultado de la operación de un reactor son muy bajas. De hecho, la principal fuente de tales emisiones



se ubica en la energía utilizada en partes del ciclo de combustible (extracción, conversión, enriquecimiento y reprocesado) y en la construcción de la planta. La operación de la planta también da lugar a emisiones despreciables de  $S_2O$  y  $NO_x$ .

La evolución de los diseños de plantas nucleares se orientan hacia incrementar los márgenes de seguridad por medio de la incorporación de dispositivos pasivos de seguridad basados en procesos físicos inherentes, simplificar y reducir los costos de construcción/operación, reducir los tiempos de aprobación (certificación/ licenciamiento), reducir dosis de radiación y otros relacionados con disponibilidad.

Las tecnologías nucleares mencionadas en los párrafos previos se refieren a los reactores llamados térmicos, en los cuales la fisión se logra con neutrones frenados por sus colisiones con el medio moderador. Una de las tecnologías más prometedoras en las próximas décadas, si la energía nuclear vuelve a adquirir ímpetu, son los llamados reactores reproductores rápidos, en los que no existe material moderador, evitando así el frenado de los reactores de fisión. Es poco probable que estos reactores tengan una amplia difusión en el futuro inmediato debido a la disponibilidad de uranio en el mercado y los precios actuales del uranio, entre otros. El consumo de uranio puede ser reducido haciendo uso de los reactores térmicos alimentados con combustibles en forma de óxidos mixtos, en los cuales el uranio fisible es sustituido por plutonio fisible proveniente del reprocesamiento. Esto puede representar un mecanismo de gestión del plutonio. En cuanto a las tecnologías de enriquecimiento, la más notable consiste en la separación isotópica por medio de láser. Esta tecnología de enriquecimiento tendría impacto en el consumo energético del ciclo de combustible y con ello sobre las emisiones.

Quizás, una de las tecnologías más promisorias en el ámbito nuclear sea la opción de pequeños y medianos reactores con elementos pasivos de seguridad basados en procesos físicos inherentes. Los proponentes afirman que es posible obtenerlos a costos razonables y que la contribución a las emisiones se bajaría al reducirse el uso de cemento, acero y componentes. De la misma manera, quizás, estas opciones ayuden a incrementar la aceptación pública de esta tecnología. De tener éxito en el desarrollo de estas opciones se abrirían nuevos mercados para las tecnologías nucleares, en especial en el área de calor de procesos, aplicaciones diversas y desde luego generación eléctrica en redes pequeñas y durante períodos de crecimiento lento de la demanda.



En resumen, las principales áreas de Investigación y Desarrollo Tecnológico se ubican en la reducción de riesgos de operación de la planta nuclear; demostración de la capacidad de la industria nuclear para contender con los residuos radioactivos de manera económica y segura; mejorar de manera sustancial la economía de las plantas nucleares; ampliar la aplicabilidad de la opción nuclear y expandir la base de recursos.

Finalmente, la fusión nuclear se encuentra actualmente en lo que se podría denominar etapa de prueba del principio. Un concepto importante es el de confinamiento y para ello se han generado dos conceptos, el confinamiento magnético y el inercial. En el primero se recurre a campos magnéticos intensos para crear las condiciones requeridas de temperatura y presión; en cambio, en el segundo se utilizan rayos láser concentrados para crear las condiciones necesarias. Los resultados recientes permiten considerar el paso de la etapa de viabilidad científica a la de viabilidad ingenieril. Se estima que se requerirá de al menos otra generación para completar el trabajo necesario.

Estos reactores presentan un alto grado de seguridad operacional debido a los bajos inventarios de material radiactivo que contienen y a las barreras pasivas que presentan a la liberación de esos inventarios radioactivos. Sin embargo, no se espera poder contar con estos antes del año 2030 debido a la investigación, desarrollo y demostración que se requiere.

#### **• *Tecnologías basadas en fuentes renovables para la generación eléctrica***

Existe una amplia gama de tecnologías para la extracción de energía útil a partir de fuentes renovables. Las principales se listan en la Tabla 5 junto con una apreciación de su estado de desarrollo tecnológico y comercial. La mayor parte de ellas son verdaderamente renovables (basadas en un suministro de combustible sustentable) y aquellas que no lo son (por ejemplo, la geotermia) se incluye dado que el tamaño del recurso es tan grande que puede ser efectivamente sustentable. De hecho, si las tecnologías basadas en fuentes renovables han de contribuir en forma más significativa (que en la actualidad) a la generación eléctrica y al abatimiento de las emisiones de gases de invernadero deberán satisfacer una serie de condiciones, entre otras: disponer de una base de recursos grande y bien distribuida; operación simple y segura; una base continua de generación; ser ambientalmente benignas; fácil transferencia de tecnología y costos poten-

ciales competitivos con las plantas de combustibles fósiles.

Las opciones más probables al año 2010 se ubican en las tecnologías de viento, fotovoltaicos, roca seca caliente, biomasa y energía de las olas en las costas. Las primeras tres presentan un gran potencial en base al valor de su recurso teórico y presentan un potencial alto para reducir emisiones a escala global. La energía de las olas en las costas se considera como un precursor de la energía de las olas fuera de las costas y con poco potencial para la reducción de emisiones de gases de invernadero.

**Tabla 5**

**Tecnologías basadas en fuentes renovables para la generación eléctrica**

Tecnología		Estado del arte	Estado de comercialización
<b>Biomasa</b>	Residuos agropecuarios	I, D	PE
	Plantaciones energéticas	I, D	PE
	Desechos urbanos	I, D	PE
	Biogas	D	PE
<b>Geotermia</b>	Hidrotérmica	M	E
	Geopresurizado	I	NE
	Roca seca caliente	I, D	NE
	Magma	I	NE
<b>Hidroelectricidad</b>	Pequeña escala	M	PE
	Grande escala	M	PE
<b>Oceánica</b>	Mareas	M	PE?
	Olas en costas	I, D	NE
	Olas en el mar	I	PE?
	Conversión de energía térmica oceánica	I, D	PE
	Gradiente salino	I	NE
<b>Solar</b>	Solar térmica eléctrica	I, D	NE
	Solar térmica	M	E
	Arquitectura solar	D, M	E
	Fotovoltaica	D, M	PE
	Termoquímica	I, M	PE?
	Fotoquímica	I	NE
<b>Eólica</b>	En tierra	D, M	PE
	En el mar	D	PE?
	Bombas eólicas	M	PE

I: Investigación  
M: Madura

E: Económica D: Demostración  
NE: No económica

PE: Económica en ciertas áreas o nichos de mercado

En el caso del viento diversos países, entre ellos México, han instalado este tipo de sistemas. Sin embargo, las experiencias en Dinamarca y el Reino Unido sugieren que el tamaño del recurso a explotar se vea limitado por problemas de aceptabilidad pública. Una posibilidad es la de instalarlos fuera de las costas. Aunque la tecnología se encuentra cerca de ser considerada madura es necesario realizar mayor investigación y desarrollo para reducir costos de generación. Además de estudiar los impactos ambientales (ruido, impacto visual e interferencia electromagnética) es necesario trabajar sobre sistemas de velocidad variable, control remoto de turbinas, mejores diseños de aspas y resistencia a daños.

La producción anual de fotovoltaicos es importante (del orden de 60 MW), pero resulta aún antieconómica con la excepción de aplicaciones en zonas remotas o muy particulares, debido a que las eficiencias de conversión son bajas (del orden del 12 por ciento) comparadas con lo que teóricamente se puede obtener (30 por ciento). La mayor parte de la investigación se orienta a incrementar la eficiencia, la economía de su aplicación y diversidad de aplicaciones.

Los recursos de roca seca caliente se encuentran a profundidades del orden de los 10 km y sus temperaturas en el intervalo de 150 a 300 °C. La investigación se centra en buena medida en demostrar los principios operaciones a escala comercial (por ejemplo, puede ser creado un reservorio de tamaño adecuado para tener un flujo sostenible por 10 a 15 años). Con el desarrollo de tecnología adecuada para roca seca calientes podría pensarse en la explotación comercial de áreas de alto grado para los años 2010 ó 2015 y para áreas de bajo grado en el 2030.

En el caso de la biomasa, además de las posibles tecnologías mencionadas en la literatura general, se puede pensar en la generación de electricidad mediante sistemas integrados de gasificación con turbina de gas. Estudios recientes indican la posibilidad de plantas de 20 a 50 MW con eficiencias del orden del 40 por ciento en los próximos años y de 50 por ciento de eficiencia para el 2010 con costos de capital más bajos que los de las convencionales. En la actualidad se encuentran bajo investigación diversos tipos de ciclos que incluyen como parte importante o central la gasificación y se considera que los materiales ligno celulósicos son los más prometedores, ambiental y energéticamente, para tal tipo de plantas.

Más allá del año 2030 se visualizan opciones como la solar térmica eléctrica, olas y viento fuera de las costas. Se estima que estas podrían tener efectos potenciales benéficos para la reducción de gases de invernación.

dero. En cambio, en el caso de gradientes salinos y otras opciones se considera que el potencial de reducción de gases de invernadero es muy pequeño.

- ***Tecnologías para los sistemas de transmisión y distribución***

Los principales impactos ambientales de estos sistemas sobre los gases de invernadero ocurren como consecuencia de las pérdidas en el sistema que originan una generación extra de electricidad y con ello emisiones. Las pérdidas depende varios factores y son específicas de cada sistema particular.

Un aspecto que merece considerarse es el almacenamiento de electricidad ya que este puede contribuir al abatimiento de las emisiones de gases de invernadero al permitir la inclusión de fuentes intermitentes como es el caso de algunas fuentes renovables. Algunas de las tecnologías de almacenamiento son maduras (rebombéo) mientras que otras lo han demostrado (aire comprimido, baterías y volantes). Estas tecnologías son económicamente atractivas para el caso de reducción en las reservas o cuando se tienen cargas pico de con altos costos de plantas. La única tecnología de almacenamiento que se encuentra en estado de investigación y con un potencial importante de resultar económicamente competitiva es el almacenamiento magnético en materiales superconductores. Los puntos centrales de esta tecnología se ubican en el desarrollo de superconductores de alta temperatura con tamaños de corriente y restricciones ambientales adecuados.

Desde luego, los aspectos no tecnológicos de la gestión de la demanda y de la planificación integral de recursos están fuertemente ligados al diseño y operación de los sistemas de transmisión y ofrecen un potencial importante en la reducción de las emisiones de gases de invernadero.

En cuanto las opciones y estrategias tecnológicas para los sistemas de transmisión y distribución hay dos formas en las que éstas pueden contribuir al abatimiento de las emisiones de gases de invernadero. La primera consiste en una más alta eficiencia de transmisión (reducción de pérdidas y conexión de fuentes renovables alejadas) y, la segunda por la incorporación de la producción distribuida de calor y electricidad.

Entre las tecnologías que se vislumbran en el mediano plazo (al 2010) se tienen las asociadas con:

1. Transmisión en corriente directa;
2. Transmisión en corriente alterna a ultra altos voltajes;
3. Sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna; y,
4. Sistemas distribuidos de generación.

La primera resulta apropiada para la transmisión a grandes distancias y será necesario profundizar en la tecnología actual de tiristores y reducir los costos de terminales.

Para la segunda se vislumbran aplicaciones de transmisión a largas distancias reduciendo pérdidas resistivas pero con creciente necesidad de compensación reactiva.

Para el tercero la automatización de la red con sistemas de estado sólido y electrónica de potencia puede dar mayor control y flexibilidad proporcionando un uso más eficiente de las líneas de transmisión.

Finalmente, en el cuarto caso se vislumbra la posibilidad que la capacidad de generación futura sea crecientemente en la forma de pequeñas plantas (producción combinada de calor y electricidad, celdas de combustible, renovables, etcétera), algunas de las cuales dan lugar a una generación variable (por ejemplo, el caso de la generación eólica).

La mayor parte, si no es que todas redes de distribución están diseñadas para un número relativamente pequeño de grandes generadores con una generación estable.

Es pues claro que habrá que estudiar las implicaciones de tales cambios en la estabilidad del sistema de distribución y de su confiabilidad.

Más hacia el futuro, digamos después del 2030, el principal desarrollo tecnológico se ubicaría en la transmisión eléctrica por medio de superconductores.

En caso de que se tenga éxito en el desarrollo de superconductores de alta temperatura se tendría la posibilidad de transmisión a grandes distancias con casi nulas o muy bajas pérdidas.

Sea dicho de paso que esto podría impulsar un verdadero mercado internacional de la electricidad. Con esto se podría pensar en supercarreteras energéticas llevando la electricidad de lugares distantes de generación (por ejemplo, instalaciones fotovoltaicas en los desiertos) a los centros de consumo.

Claramente, las implicaciones de tal desarrollo tecnológico sobre la seguridad energética, consideraciones ambientales y desarrollo sustentable serían aspectos que habrían de ser analizados a escala global.

## **Conclusiones**

Además de las conclusiones de carácter específico (para una fuente, tecnología, acción de mitigación ambiental, etcétera) esbozadas en la sección particular, se desprenden diversas conclusiones de carácter general que tienen impacto en diversos sectores del país, tanto energético en general, como petrolero y eléctrico en particular, así como otros sectores económicos.

De acuerdo con los resultados de las proyecciones de energía presentadas en este trabajo, independientemente de cuál sea el escenario de crecimiento económico que se presente en el futuro, resulta claro que el país para continuar desarrollándose requerirá de más energía. Dada la estructura energética del país, con una alta dependencia (del orden del 90 por ciento) de los combustibles fósiles, y de su tendencia creciente que no parece factible modificar en el corto y mediano plazos, las estrategias deben de necesidad basarse en impulsar el uso eficiente de la energía y la sustitución de combustibles, en particular el combustóleo por gas natural. Es importante y recomendable que se revalúe la opción nuclear para la generación eléctrica. La operación exitosa ya demostrada en las unidades de la Central de Laguna Verde dan confianza en la capacidad técnica para la construcción y operación de este tipo de plantas.

Sería recomendable la promulgación de una Ley de Uso Racional de la Energía, que permita reforzar la aplicación de las Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética existentes y promover la elaboración de otras hasta abarcar todo el sistema energético. Asimismo, la existencia de la ley haría obligatorio tomarla en cuenta en la elaboración de los planes energéticos del país y de los diversos sectores. Se impulsaría así la modernización de diversos sectores industriales rezagados en sus procesos y se propiciarían otros sectores de importancia fundamental para el país.

Uno de estos sectores, de importancia fundamental, es el educativo, de investigación, básica y aplicada, y de desarrollo tecnológico. A riesgo de ser injusto con algún grupo serio de investigación y/o desarrollo tecnológico en el país, la formación de grupos de excelencia en estos ámbitos no parece ser, en la realidad, un objetivo nacional. Tampoco parece ser un objetivo nacional el desarrollo o la participación en el desarrollo de tecnologías de futuro. Más bien parece privar la lógica de adquirirlos de los países más avanzados olvidándose con ello de la ruta del valor agregado y de un cierto grado de independencia tecnológica; parece también privar la visión

miopía del corto plazo olvidándose del largo plazo, de sus beneficios para las generaciones presentes y futuras. No parece haber la visión (por parte del gobierno y las empresas nacionales) y la consecuente decisión sobre los beneficios de invertir en un cierto grado de desarrollo tecnológico independiente, aportando recursos económicos y materiales acordes con la dimensión de la problemática tecnológica pertinente, estableciendo las áreas en las que convenga competir y los riesgos correspondientes. En última instancia desarrollo tecnológico significa recursos humanos de alto nivel, pero no basta contar con estos recursos, es necesario invertir recursos económicos y materiales, identificar nichos de oportunidad y correr los riesgos inherentes a las actividades de investigación y desarrollo.

Este trabajo no analiza las potencialidades energéticas, ambientales o económicas de cada tecnología ni cuantifica su potencialidad para reducir las emisiones de gases de invernadero, tampoco identifica o pretende identificar las tecnologías particulares para alcanzar una meta específica de eficiencia energética, de reducción de emisiones de gases de invernadero o qué combinación de medidas y tecnologías permitirían alcanzar una meta dada de reducción en las emisiones al menor costo. Sin embargo, pretende estimular y, en alguna medida, proporcionar elementos de discusión y análisis que ayuden a ubicar, identificar, establecer y, en su caso, acelerar y potenciar programas (del gobierno y/o sector privado) ambiciosos de eficiencia energética y desarrollo tecnológico, programas que vayan más allá de los efectos de los precios, del ingreso y de las políticas energéticas tradicionales.

Si el patrón actual de suministro energético ha de continuar, basado en la infraestructura existente de combustibles fósiles y en la disponibilidad de las tecnologías asociadas, entonces, las áreas más atractivas para desarrollo tecnológico se ubican en aquellas asociadas con las mejoras de la eficiencia energética de los combustibles fósiles (en la producción, conversión y uso final) y con la captura y disposición de los gases de invernadero.

Si a lo largo del tiempo se decide seguir hacia una modificación importante del suministro energético, entonces las tecnologías nuclear y/o de fuentes renovables podrían jugar un papel importante en la mezcla de la oferta y suministro energético y en la reducción de gases de invernadero.



## **LA NUCLEOELECTRICIDAD Y EL MANEJO DE MATERIALES RADIOACTIVOS**

Héctor Cuapio Ortiz

Sindicato Unico de Trabajadores de la Industria Nuclear, SUTIN

Si recapacitamos un momento son escasas las actividades humanas que no producen desechos. Algunos de ellos no sólo son difíciles de reintegrar a la naturaleza sin producirle deterioro, sino que además son peligrosos o en algunos casos, muy peligrosos para la vida del hombre. Estos últimos desechos se producen generalmente en las actividades industriales en distintas formas físicas y en grandes volúmenes.

La contaminación atmosférica, la del agua y la del suelo con la muestra más evidente de la contaminación que sufre el medio ambiente, como consecuencia de las actividades humanas. A esa contaminación todavía no se le ha dado la importancia debida, quizá por entender que surge de condiciones casi naturales derivadas de que tal fenómeno es natural.

Como el motivo de esta ponencia es abordar el manejo de los materiales radiactivos, a continuación presentaré un breve resumen de las clases de residuos de bajo nivel que cabe esperar de las distintas aplicaciones industriales y médicas de la radiactividad (Tabla 1), al mismo tiempo se presenta una estimación de los mismos que se generan anualmente en nuestro país.

Los desechos radiactivos de alta actividad son los producidos en el reprocesamiento del combustible, los transuránidos (dícese de los elementos químicos de número atómico superior al Uranio (92), que se obtienen artificialmente en el reactor nuclear), o productos contaminados con radionúclidos alfa de larga vida y alta actividad específica, el combustible irradiado y materiales derivados o subproductos.

Conviene separar los residuos radiactivos en dos grupos: líquidos y sólidos, ya que su tratamiento posterior ha de ser algo diferente. En los residuos líquidos, el material radiactivo se encuentra en solución y una parte del volumen generado podrá ser tratado con resinas iónicas o dejarlo decaer durante un cierto tiempo, para luego evacuarlo previa dilución y dentro de especificaciones a la red general.



Los residuos sólidos habrán de ser almacenados de forma temporal o definitiva aunque, como en el caso de ser incinerados, sean sólo las cenizas las que hallan de almacenarse.

**Tabla 1**

**Tipo, clase y cantidad de residuos radioactivos generados en México**

Tipo de instalación	Clases de residuos originados	Cantidad anual estimada	Observaciones
<b>Médica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquidos. Radionúclidos emisores beta y gamma</li> <li>• Sólidos. Frascos, material y equipo contaminado, jeringas, etc. Fuentes encapsuladas agotadas o fuera de uso (Ir-192, Ra-226, Au-198, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para los líquidos 150 kCi (5 550 TBq)</li> <li>• Para los sólidos 45 kCi (1 665 TBq)</li> </ul>	
<b>Industrial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólidos. Fuentes encapsuladas agotadas o fuera de uso Resinas iónicas de tratamiento de residuos líquidos Material contaminado (ropas, herramientas, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para los sólidos 90 kCi (3 300 TBq)</li> </ul>	

Las fuentes de los residuos de baja actividad se pueden englobar, según su procedencia, en tres amplias clases: reactores nucleares, instalaciones médicas y de investigación e instalaciones industriales. Los primeros consisten esencialmente de restos de filtros, resinas, guantes, trajes de protección usados, trapos, herramientas, papel y plásticos.

Los segundos, son los derivados de la investigación con materiales radiactivos, diagnosis médica, terapia e investigación médica e incluyen similares desechos que los anteriores con la adición de productos químicos orgánicos contaminados y restos de animales diversos.

Los desechos industriales derivan de la fabricación de productos farmacéuticos, detectores de humos, esferas luminosas, señales de salida de emergencia y otros dispositivos de medida y calibración utilizados en el amplio espectro de las actividades industriales.

La normativa aplicable a la evacuación de desechos radiactivos es

muy diversa y compleja y requiere una revisión cuidadosa de las normas aplicadas según los desechos.

Los titulares de las instalaciones que producen desechos de esta naturaleza deben ser conscientes de todos los aspectos que implican la evacuación y deben asegurarse de que todas las partes afectadas en el transporte y eliminación son experimentadas y de responsabilidad probada.

De forma general, los desechos radiactivos se eliminan por dos caminos:

1. El titular de la instalación donde se han producido actúa de remitente o expendidor y coordina el transporte, e, incluso, el enterramiento, lo que lleva consigo preparar toda la documentación necesaria, marcaje, etiquetase, embalaje y controlar el envío o expedición; y,
2. El titular puede contratar unos servicios determinados para la eliminación de los desechos que incluyan, por una parte, el transporte y, por otra, la propia eliminación llevada a cabo por una entidad que se responsabiliza de todas las operaciones hasta transferirlos al cementerio autorizado.

Una vez identificado el material, la cantidad y su forma, debe seleccionarse el embalaje correcto; debe asegurarse que el embalaje cumpla las pruebas y especificaciones de diseño, de forma que no pueda producirse la pérdida de su contenido y mantenga las propiedades de blindaje contra la radiación; además deben cumplir ciertas condiciones de prueba en un accidente con una pérdida limitada de la integridad de protección y esencialmente con ninguna pérdida de la contención.

La utilización de las radiaciones ionizantes resulta peligrosa a causa de los efectos nocivos que pueden causar cuando interaccionan con los seres vivos. Sin embargo, la contingencia o proximidad de los daños nucleares a ellas atribuibles, es decir, el riesgo derivado de su utilización, puede hacerse tan remoto como se quiera, con tal de aumentar la seguridad en el proceso general de la manipulación de las fuentes de radiaciones ionizantes.

A lo anterior se le llama gestión de residuos radiactivos. En su forma más general, la gestión de los residuos radiactivos se puede definir como el conjunto de actividades técnicas y administrativas que tienen por objeto acondicionarlos y controlarlos de forma que no causen daño alguno a la

salud y a los bienes de las personas.

La dispersión en el medio ambiente se hace siempre bajo control radiológico, de acuerdo con las normas internacionales de evacuación y teniendo en cuenta la capacidad de admisión del medio receptor, para lo cual hay que hacer los estudios ecológicos pertinentes.

Invariablemente en la gestión de desechos radiactivos, el trabajador debe comportarse según el criterio denominado ALARA. El término ALARA significa "tan bajo como razonablemente pueda alcanzarse"; es un criterio internacional que establece que no sólo se deben tomar las medidas y precauciones apropiadas para mantener la dosis de radiación al personal ocupacionalmente expuesto y al público en general, por debajo de los límites fijados, sino que además, deben hacerse todos los esfuerzos razonables para mantenerla tan baja como sea posible, tomando en cuenta los factores tecnológicos disponibles y los factores económicos y sociales aplicables.

Las posibilidades de evacuación o aislamiento de residuos radiactivos son:

1. Transmutación;
2. Evacuación extraterrestre;
3. Evacuación en las capas de hielo de la Antártida;
4. Colocación sobre los fondos marinos (zonas abismales);
5. Almacenamiento en instalaciones de superficie;
6. Almacenamiento en formaciones geológicas profundas; y,
7. Almacenamiento en el subsuelo marino.

EL método más utilizado en los últimos tiempos para el almacenamiento de los desechos radiactivos, es el enterramiento.

Las propiedades importantes para ese enterramiento en formaciones geológicas son las siguientes:

1. Suficiente profundidad;
2. Estabilidad geológica;
3. Facilidad de determinación, con garantía de las condiciones hidrogeológicas;
4. Ausencia de agua o agua con escaso movimiento; y,
5. Buenas propiedades térmicas de las rocas.

Los residuos radiactivos han de ser confinados en contenedores o matrices cuyo propósito fundamental es el de inmovilizar los residuos radi-

activos.

Las características de las matrices a utilizar son:

1. Actividad de los residuos a que se aplica;
2. Cantidad de residuos que admite (por ciento en peso);
3. Estabilidad frente a las radiaciones;
4. Insolubilidad en agua;
5. Conductividad térmica;
6. Resistencia al fuego;
7. Resistencia mecánica; y,
8. Variación de volumen.

Las propiedades a tener en cuenta para la elección de matrices sólidas son:

1. Estabilidad química;
2. Estabilidad térmica;
3. Estabilidad a la radiación;
4. Resistencia a la lixiviación;
5. Conductividad térmica;
6. Resistencia al fuego;
7. Resistencia mecánica;
8. Compatibilidad con el contenedor; y,
9. Capacidad de incorporación, especialmente deseables para los residuos de alta actividad.

El tema de nucleoelectricidad, manejo de materiales radiactivos es demasiado amplio. No pretendo agotar el tema y por ello, para terminar este breve escenario, informaré a ustedes los trabajos realizados en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares a lo largo de este año.

## ANEXO

### Investigación y desarrollo de la energía nuclear

Un capítulo esencial de la problemática general de las centrales nucleares procede del hecho de que cualquier tipo de reactor produce residuos radiactivos cuya eliminación, en forma de almacenamiento prolongado y seguro, plantea problemas de consideración sobre todo cuando se trata de radioisótopos de vida muy larga, para los que hay que asegurar entre otras condiciones, que el almacenamiento ofrezca suficientes garantías de contención en el tiempo. Sin embargo, procede investigar con detalle el transporte de las sustancias radiactivas objeto de almacenamiento a través de los materiales del entorno, así como los procesos de su interacción física, química y biológica con el medio ambiente. Tal es el procedimiento de diversos proyectos multinacionales de I & D como son los denominados STRIPA, HYDROCOIN, SYVAC e ISIRS que se describen más adelante, así como la consecución de un Banco Termoquímico de Datos.

Otro aspecto del mismo problema lo constituye el almacenamiento previo, durante meses o años, en piscinas, de los elementos combustibles irradiados, a fin de que la consiguiente disminución de su radiactividad haga más fácil su posterior reelaboración, si así fuera decidido. Por otra parte, en los últimos años, la connotación política asociada a la reelaboración, ha llevado a algunos gobiernos a conferir carácter de residuo final al propio elemento gastado, lo que supone un cierto I & D adicional para garantizar la integridad y confinamiento del elemento durante periodos de tiempo mucho más largos, bien en seco o en húmedo.

#### El término fuente

En los últimos diez años éste ha sido uno de los temas más estudiados en el área de la seguridad nuclear. Se entiende bajo tal denominación la cantidad de radiactividad desprendida en un accidente con fusión total o parcial del núcleo de una central nuclear, su evolución temporal, su forma física y química y demás características necesarias para especificar completamente su dispersión en el medio ambiente. Originalmente, la expresión

"término fuente" se refería a la cantidad de radiactividad liberada al ecosistema procedente de cualquier instalación y circunstancia, aunque en la actualidad se refiere casi específicamente a lo detallado al principio del párrafo.

Su conocimiento es fundamental para los organismos reguladores y oficinas de diseño de I & D en actividades tales como planes de emergencia, análisis de riesgos, remodelación de instalaciones (back-fitting).

En un accidente nuclear la emisión al medio ambiente de productos de fisión gaseosos y aerosoles tiene lugar si aquéllos son capaces de atravesar las cuatro barreras existentes:

1. La propia pastilla del combustible, que tendría que fundirse;
2. La vaina, que tendría que fallar, al menos parcialmente;
3. El sistema primario del reactor, que tendría que perder su integridad; y,
4. El edificio de contención, que debería perder su hermeticidad.

El primer intento serio de cuantificar el "Término Fuente" puede encontrarse en el documento WASH-1400 (1975), Reactor Safety Study, realizado por el Prof. Rasmussen de la Universidad de MIT de los Estados Unidos, publicado en 1975. Sin embargo, en aquella época no se conocían bien ciertas partes de la fenomenología global de estos accidentes, y se recurrió a modelos simplificados basados en hipótesis muy conservadoras.

Desde entonces ha tenido lugar un gran esfuerzo investigador en el mundo, especialmente en los Estados Unidos, Europa y Japón, que han demostrado a nivel cuantitativo el conservadurismo de las hipótesis del WASH-1400.

Las consecuencias más notables de este esfuerzo podrían resumirse de la siguiente forma:

- a) El término fuente ya puede calcularse de forma causal, en vez de recurrir a estimaciones basadas en hipótesis;
- b) Se dispone de un conocimiento más profundo y detallado de la química de los productos de fisión gaseosos emitidos en un accidente grave. Se tiene, por ejemplo, cierta evidencia de que es mucho más probable que elementos como el Cesío, Yodo, Telurio y Rutenio reaccionen física y químicamente con los elementos del entorno, en vez de emigrar al recinto de contención y de allí al

exterior, si falla dicho recinto;

Este fenómeno quedó claro en el accidente de Three-Mile Island en 1979, cuando la cantidad de  $I_{131}$  medido en el exterior de la central nuclear resultó ser mucho menor de lo esperado. La razón es que se había combinado con otro producto de fisión, el Cesio, para formar la sal ICs, que quedó confinada por disolución en la propia agua de refrigeración.

- c) La condensación de algunos gases de fisión en la atmósfera contaminada, el comportamiento de los aerosoles y el arrastre por el agua de los sistemas de rociado, es un mecanismo mejor entendido en la actualidad, que también supone una reducción en el término fuente; y,
- d) Los recintos de contención son mucho más resistentes que lo requerido en el diseño, frecuentemente entre dos y cuatro veces. Esto significa que si en un accidente grave llegasen a fallar, esto sucedería mucho después de lo supuesto en el WASH-1400, lo que significaría una notable reducción de emisión radiactiva al exterior, debido a que los mecanismos de retención de los gases de fisión dispondrían de mayor tiempo de actuación.

Los cuatro mecanismos antes expuestos, han sido comprobados experimentalmente, aunque no de forma definitiva. Todavía son necesarios bancos de datos más completos, y la incorporación de modelos de comportamiento y validación de códigos de cálculo, a fin de que los organismos reguladores puedan redactar nuevas normas en temas tales como planes de emergencia, análisis de riesgos, radios de exclusión, nuevas tecnologías, análisis de emplazamientos, etcétera.

También queda por hacer investigación relativa a sistemas de limpieza de aire y ventilación (también aplicables a fábricas de combustible y reelaboración).

El costo de este tipo de investigaciones sobre el Término Fuente mencionado es muy alto, naturalmente dependiendo de los programas. Como ejemplo tenemos el proyecto IDCOR financiado por 61 organismos constituidos por compañías eléctricas y de ingeniería; el STEP (Spurce Term Experiment Program), gestionado por el Argonne National Laboratory con la colaboración del Electric Power Research Institute (EPRI), Ontario Hydro de Canadá, DOE, NRC y Belgonucleaire y la instalación DEMONA (Frankfurt-Batelle) que sólo para analizar el comportamiento de aerosoles,

dispone de un edificio cilíndrico de hormigón de 640 metros cúbicos.

### • **Situación nacional**

México, con sus 1308 MW<sub>e</sub> nucleares instalados, debe tener interés en participar en la investigación que queda por hacer, en colaboración con organismos como la Nuclear Regulatory Commission (NRC) y el EPRI, y especialmente con EURATOM y el CSIN (Comité de Seguridad de Instalaciones Nucleares) de la AEN de OCDE que en la actualidad ha constituido un grupo especial de trabajo sobre este tema, en el que sería adecuado que participaran cinco especialistas mexicanos, por lo menos a nivel de "software".

Los organismos interesados en México son, naturalmente, la CNSNS por su naturaleza de organismo de control, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en su calidad de explotadora de la Central de Laguna Verde, el ININ por su implicación evidente como fabricante del combustible para Laguna Verde y otras centrales del mundo. El ININ debe participar fundamentalmente en los temas relativos a la integridad de la vaina, dispersión de aerosoles y su comportamiento. Por su naturaleza de organismo de I & D y por su importante complejo informático y técnico, el ININ debe crear un Banco de Datos asociado al término fuente.

### **Reelaboración de combustibles irradiados**

La reelaboración es la etapa que cierra el ciclo del combustible nuclear y tiene por objeto separar el Uranio y el Plutonio contenidos en los combustibles irradiados. En esta etapa se originan residuos altamente radiactivos, formados por los productos de fisión y de activación de combustible, y se obtiene Plutonio, que es un material fisionable especial.

La tecnología de la reelaboración se ha desarrollado en torno al proceso PUREX, que consiste en la separación del Uranio y del Plutonio, y de éstos entre sí, mediante el empleo de técnicas de extracción con disolventes orgánicos.

Aplicada la reelaboración a los combustibles de los reactores de agua ligera, permite la recuperación del Uranio no quemado -que puede reinyectarse en el punto apropiado del ciclo del combustible- y la obtención del Plutonio (0.3 Tn/(GW\*a) que puede emplearse como sustituto del Uranio-235 en los reactores de agua ligera (reciclado térmico del Plutonio) o como



material fisionable de los reactores reproductores rápidos.

### • **Situación internacional**

La tecnología de la reelaboración se ha aplicado desde el principio de la era nuclear a la extracción del Plutonio-239 con fines militares. De ahí el carácter de tecnología "sensible" que tiene la reelaboración en el ámbito político internacional.

En el plano civil, la reelaboración ha adquirido madurez industrial aplicada a los combustibles de "óxidos", principalmente en aquellos países con mayor desarrollo tecnológico y con menores recursos energéticos, como Francia, Japón, Alemania e Inglaterra. En los Estados Unidos, la política antinuclear del Presidente Carter impidió la consolidación de las plantas existentes (West Valley, Morris y Barnwell), que nunca volvieron a entrar en funcionamiento. En cuanto a la reelaboración de los combustibles de "óxidos mixtos", Francia e Inglaterra están a la cabeza.

En nuestro país, el reactor Triga debido a la fisión del Uranio, ha generado Plutonio; sin embargo a la fecha no hemos podido reelaborar y por lo mismo no hemos separado el Plutonio; eso significa que México no ha separado productos de fisión.

El PNME 90-94 y la Ley Nuclear, introducen la idea de considerar a los combustibles irradiados como residuos y algunas publicaciones nacionales constatan que la "política mexicana en relación con la última fase del ciclo del combustible, se basa en el almacenamiento temporal del combustible irradiado en piscinas (como en Laguna Verde), hasta que se decida la conveniencia de proceder a su reelaboración (ciclo cerrado del combustible) o a su abandono controlado (ciclo abierto del combustible)".

### **Estimación cuantitativa**

El PNME 90-94 fija en 1.3 GW el parque nuclear mexicano cuya alimentación, a razón de 30 toneladas de Uranio enriquecido al tres por ciento U (3%) por GW año, requiere anualmente de 39 toneladas de combustible.

Este combustible procede del enriquecimiento del Uranio natural, U, en la proporción de 160 toneladas de U por cada 30 toneladas de U (3%), requiriéndose, por lo tanto, anualmente, 208 toneladas de Uranio natural, cantidad que nos permite establecer un objetivo para el año 2000 de 167 toneladas de  $U_{308}$  /año.

Con ello, y aun congelando el Programa Nuclear Mexicano en 1.3 GW, y suponiendo una vida de 30 años para ambas centrales, hacia el año 2015 el parque mexicano habrá generado:

$$30 \text{ años} \times 39 \text{ tn U (3\%)/año} = 1\,170 \text{ tn U (3\%)}$$

$$30 \text{ años} \times 208 \text{ tn U/año} = 6\,240 \text{ tn U}$$

De las cantidades anteriores, es obvio expresar que se tendrán casi las 1 170 toneladas de U enriquecido al tres por ciento irradiados y se habrá consumido 6 240 toneladas de Uranio natural. Estos datos coinciden con el orden de las reservas mexicanas que Uramex cuantificó en 16 000 toneladas de  $\text{U}_3\text{O}_8$ , explotables y 22 000 toneladas de  $\text{U}_3\text{O}_8$  en estudio.

Es decir, existe una correlación ajustada entre el tamaño del parque y las reservas nacionales de Uranio. Con esta planificación se podrán satisfacer  $0.532 \times 10^{12}$  KWh. Si consideramos que en 1985 hubo un consumo eléctrico nacional de  $0.19 \times 10^{12}$  KWh, entonces con las toneladas de Uranio estimadas, es posible satisfacer 2.8 años equivalentes de consumo eléctrico, referidos a 1985.

El problema que queda pendiente consiste en qué hacer con las casi 1 170 toneladas de combustible irradiado. A este respecto hay tres posibles respuestas:

- a) Los combustibles irradiados pueden considerarse como irre recuperables; si así fuese, la era de la energía nuclear de fisión habría proporcionado a México, según se apuntaba antes, 2.8 años equivalentes de electricidad a nivel de consumo del año de 1985;
- b) Los combustibles irradiados pueden ser reelaborados siguiendo las recomendaciones de la NRC, o bien de la Comisión de la Comunidad Europea y desde luego de la CNSNS (organismo regulador de México), con objeto de entrar a principios del siglo XXI en una economía energética dominada por los reactores rápidos, con combustibles de "óxidos mixtos". En este caso, la cantidad de energía que podría extraerse sería unos dos órdenes de magnitud superior, y podría proporcionar unos 280 años-equivalentes de electricidad a nivel de 1985, con lo cual el panorama energético cambiaría radicalmente; y,
- c) La solución intermedia, consistiría en almacenar los combustibles irradiados de modo "recuperable" con el fin de tener acceso a un

potencial energético considerable, sobre el que se podrían tomar decisiones en el futuro.

Una vez estimada la dimensión del problema energético relacionado con la reelaboración del combustible, la toma de decisiones implica los siguientes aspectos básicos:

1. Decidir si la era de la energía nuclear de fisión ha concluido para México con la actual generación de reactores de agua ligera; en caso afirmativo, sólo habría que preocuparse de los combustibles irradiados y del Uranio empobrecido como residuos irrecuperables. La reelaboración no es necesaria y la tecnología de residuos aparentemente se simplifica, pero el problema de los residuos se agrava a largo plazo;
2. Si aún dando por concluida la era nuclear se admitiera la conveniencia de la reelaboración, podrían extenderse las reservas de combustible en un 30 por ciento, a través del reciclado térmico del Plutonio (aprox. 11.6 Tn) en reactores de agua ligera. En este caso habría que disponer de la fabricación de combustibles de "óxidos mixtos" para reactores térmicos, además de los servicios de reelaboración;
3. Si no se da por concluida la era nuclear de la fisión, la reelaboración y los reactores rápidos resultan absolutamente necesarios. Ello implicaría tenerse que asociar con las empresas americanas y europeas de construcción y explotación de reactores rápidos tales como FRAMATOME, NIRA, NERSA, GE y Westinghouse, para obtener una cuota de participación y adherirse al Memorandum de Entendimiento (1984) de optimización de los programas de I & D correspondientes; y,
4. La reelaboración del combustible mexicano es una operación que puede resolverse con base en el pago de servicios en el extranjero, si no surgen complicaciones políticas, o mediante el desarrollo propio de la tecnología necesaria. Esta última opción es muy difícil de realizar sin un cambio radical en la planificación energética mexicana.

### **El proyecto STRIPA**

En la actualidad se acepta internacionalmente que la opción más

cualificada para la eliminación segura de residuos altamente radiactivos generadores de calor, es su emplazamiento en formaciones geológicas profundas. La mayoría de los países de la OCDE y los EEUU han investigado este tema durante años, mostrando que tal eliminación es posible y segura, y que para confirmarlo es necesario seguir investigando en condiciones realistas. Los experimentos *in situ* correspondientes, proporcionarán la siguiente información:

1. El desarrollo de las herramientas necesarias para la obtención de datos requeridos para la caracterización de emplazamientos;
2. La investigación de los fenómenos que podrían afectar la capacidad de retención de los repositorios;
3. La obtención de experiencia para la incorporación de salvaguardias técnicas a los almacenamientos; y,
4. Datos y modelos fenomenológicos para ser incorporados en códigos de cálculo y bases de datos, para su aplicación posterior a otros posibles emplazamientos.

En 1977 inició un proyecto de este tipo con auspicios sueco-americanos en la mina Stripa en Suecia en un entorno de granito, que en 1980 fue ampliado a nueve países de la NEA (Canadá, Finlandia, Francia, Japón, Suecia, Inglaterra, Estados Unidos,...), en lo que fue llamado la Fase I del Proyecto Internacional Stripa. La explotación corre a cargo de la SKB (Compañía Sueca de Combustible Nuclear y Gestión de Residuos). Durante la Fase II que terminó en 1986 se trabajó en las siguientes áreas:

1. Investigaciones hidrogeológicas del granito y emigración de trazadores en sistemas con fracturas simples y múltiples;
2. Detección y caracterización de zonas de fractura en granito;
3. Investigaciones hidrogeoquímicas de aguas subterráneas;
4. Comportamiento de la arcilla bentonítica como material de sellado y relleno en condiciones realistas; y,
5. Suministro de datos y modelos para códigos de cálculos y bases de datos (Proyectos Hydrocoin, ISIRS, Banco termoquímica de datos y SYVAC).

Los resultados obtenidos hasta ese momento fueron el desarrollo de herramientas y técnicas para la evaluación de emplazamiento en entornos

de granito, y experiencia en salvaguardias y barreras tecnológicas en los repositorios. Se concluyó también que no hay una técnica única de evaluación de la hidrología en un entorno, sino que es necesario usar una combinación de técnicas hidrogeológicas, geofísicas y geoquímicas.

En la Fase III del proyecto que terminó en 1994, se contempló la aplicación de las técnicas anteriormente desarrolladas y la comparación de predicciones de flujos de agua subterránea y emigración de trazadores con resultados experimentales para la validación de modelos.

#### • **Situación nacional**

Desde el punto de vista mexicano hay un interés evidente en este tema, en el que se aprecia necesaria la participación de personal de las empresas locales involucradas en la mina Stripa, a fin de adquirir de primera mano la información precisa sobre ciertas técnicas imprescindibles para la evaluación de emplazamientos, tales como emigración de trazadores, métodos sísmicos, hidráulicos y de radar para la localización de zonas de fractura, comportamiento de la bentonita como material de relleno, etc. Asimismo, es necesario el conocimiento de los métodos de obtención de datos geofísicos, geoquímicos y termodinámicos, que junto con los modelos de emigración y transporte de radioisótopos en distintas formas físicas y químicas sirven para elaborar bases de datos y códigos de cálculo como los citados anteriormente, necesarios para la evaluación de emplazamientos.

#### **Proyecto hydrocoin**

Originalmente empezó a desarrollarse en Suecia por parte del SKI (Swedish Nuclear Power Inspectorate), aunque a partir de 1983 la NEA (Agencia para la Energía Nuclear) del OCDE ha ido teniendo una participación cada vez mayor en él.

Básicamente trata sobre la investigación de los caudales de agua subterránea a cuenta de la incidencia que pueden tener en el transporte de productos radiactivos (disolución, suspensión o reacción química), procedentes de algún almacenamiento de residuos, en que por razones naturales o artificiales se hayan deteriorado, total o parcialmente las barreras técnicas incorporadas para su contención.

Sus temas de investigación son por lo tanto, detección de los caudales, medida de su magnitud, hidrodinámica, interacción con el material

geológico de soporte y modelación teórica para la realización posterior del "software". Este proyecto está íntimamente relacionado con:

1. Stripa, puesto que en dicha mina se caracterizan zonas geológicas, se desarrollan instrumentos de diagnóstico y se miden caudales después de identificar las trayectorias;
2. ISIRS, que investiga la adsorción sobre el material geológico de los productos radiactivos contenidos en las aguas subterráneas; y,
3. SYVAC, puesto que en este proyecto se integran todos los anteriores.

El Radioactive Waste Management Committee de la NEA decidió en 1983 participar como observador en el proyecto Hydrocoin de SKI, formulando a finales de 1984 las siguientes recomendaciones:

1. El proyecto Hydrocoin es de gran interés para el análisis de la seguridad de los sistemas de almacenamiento de residuos;
2. Comprende tres niveles: intercomparación, validación y análisis de sensibilidad;
3. NEA debe participar en este proyecto de la siguiente forma:
  - Ayuda administrativa y de organización;
  - Distribución y comprobación del "software"; y,
  - Participación total en el proyecto Hydrocoin.

Por las relaciones ya mencionadas con otros proyectos del área del almacenamiento de residuos radiactivos, así como por el interés actual de México en estos temas y por la posible participación del ININ en los comités de la NEA, parece muy razonable la participación en este proyecto. Esta conclusión resulta lógica toda vez que México forma parte ya de la OCDE.

### **El proyecto SYVAC**

En este proyecto (Systems Variability Analysis Code) se está llevando a cabo la puesta a punto de un conjunto modular de códigos de cálculo, aplicables a la emisión, dispersión y transportes de residuos. Se pretende la estimación del riesgo asociado a dichos procesos, en términos probabi-

lísticos, teniendo en cuenta la variabilidad del sistema y las incertidumbres asociadas a los parámetros que lo caracterizan. Es decir, el sistema SYVAC, de naturaleza análoga a las técnicas de evaluación probabilística de riesgo (PRA) está concebido específicamente como herramienta completa para la evaluación de posibles emplazamientos de almacenamientos de residuos radiactivos.

Mediante la aplicación de esta técnica, es decir, de este conjunto de códigos y del banco de datos correspondiente, se obtendrá el riesgo total asociado a un almacenamiento, teniendo en cuenta los diversos modos posibles de fallo de la instalación (naturales o artificiales), el transporte de los productos radiactivos a lo largo de todas sus trayectorias posibles, su suspensión o disolución en aguas de lixiviación subterráneas y su transporte consiguiente, su adsorción sobre los materiales geológicos del entorno, sus reacciones químicas con los elementos que encuentre a su paso y su incorporación en la biosfera, con su daño asociado. Todo esto teniendo en cuenta la variabilidad del entorno a través del tiempo. Por supuesto, y al igual que en el caso de un PRA, además del riesgo global, se determinan los puntos más débiles, es decir, los de máxima incidencia en el riesgo total de todo el conjunto.

Este tipo de análisis se inició en Canadá a finales de la década de los 70's y en la actualidad la AECL canadiense terminó el trabajo de la tercera versión de su sistema de códigos. Así mismo los ingleses a partir de una versión preliminar del código canadiense, han desarrollado un sistema adaptado estratégicamente a su entorno. También en Suecia y en la comunidad europea han prestado gran atención a este tema.

La Agencia para la Energía Nuclear del OCDE (NEA) ha concluido dentro del Radioactive Waste Management Committee (RWMC) la conveniencia de organizar con el apoyo de su infraestructura un grupo de usuarios de todos los países miembros interesados que coordine el desarrollo y la utilización de este tipo de códigos y que específicamente tenga las siguientes misiones:

1. Intercambiar códigos, experiencia e información a fin de evitar duplicación de esfuerzos;
2. Comparación de puntos de vista;
3. Discusión sobre temas técnicos específicos, tales como Garantía de Calidad y Validación de los Códigos; e,
4. Identificación de los temas que merecen ser desarrollados.



En el momento actual se dispone en el mundo de los SYVAC I y II desarrollados por AECL (Canadá), los SYVAC A y C desarrollados en Inglaterra y el LISA desarrollado en EURATOM, disponibles para el grupo de usuarios en el Data Bank de NEA (París), junto con la documentación necesaria.

En cuanto a los tópicos propuestos hasta el momento para su investigación e incorporación de códigos tipo SYVAC los de más interés son los siguientes:

1. Adquisición, disponibilidad y manejo de datos;
2. Métodos y procedimientos para análisis de sensibilidad;
3. Procedimientos de muestreo estadístico;
4. Propuesta de un problema tipo "Benchmark" de validación de códigos;
5. Dosimetría del Yodo; y,
6. Modelación de la evolución a largo plazo de la geología de entornos.

#### • **Situación nacional**

En México se considera el problema de los residuos radiactivos como de interés prioritario, habiéndose establecido el ININ como un ente de asesoría y en su caso de recolección (Centro de Almacenamiento de Desechos Radioactivos, CADER-MAQUIXCO). El proyecto que se comenta en este apartado es de importancia capital para su programa, puesto que su aplicación permitiría la evaluación cuantitativa de los posibles emplazamientos para repositorios. Por otra parte, al estar actualmente centralizado el tema en la NEA (que también coordina proyectos relacionados y auxiliares como STRIPA, Hydrocoin e ISIRS), organización con la que puede colaborar activamente México en diversos comités y al estar EURATOM dentro de los participantes con sus instalaciones de ISPRA y su modelo LISA, la participación mexicana es recomendable, por ejemplo vía España.

#### **Proyecto ISIRS**

El proyecto ISIRS (Internacional Sorption Information and Retrieval System) se ocupa de la constitución y mantenimiento de una base de datos de almacenamiento y manipulación de información relativa a la adsorción de radioelementos en solución en una base acuosa sobre materiales geo-



lógicos. En el tema general de almacenamiento de desechos radiactivos este es un capítulo de importancia capital, puesto que analiza la probabilidad de que un radioisótopo escapado por causas naturales o artificiales del almacenamiento en que estuviera confinado, quede retenido por adsorción sobre los materiales geológicos del entorno,

Se estableció en 1981 con la colaboración de 11 países (Alemania, Canadá, Francia, Finlandia, Holanda, Italia, Japón, Suecia, Suiza, Inglaterra y Estados Unidos). Durante el primer período de dos años el "software" fue desarrollado por la Pacific Northwest Laboratories (PNL) de USA y a continuación toda la actividad fue transferida al NEA Data Bank en Saclay, con una extensión de dos años más, es decir hasta julio de 1985, fecha en la que su comité técnico ha recomendado que ISIRS continúe de forma regular en NEA como servicio a los países que lo soliciten, quienes proporcionarían su financiación, estimada en 50 000 francos franceses por participante. Las actividades de esta nueva fase fueron:

1. Mantenimiento y puesta al día de la base de datos; y,
2. Búsqueda de datos en respuesta a la solicitud del país participante.

ISIRS en la actualidad dispone de más de 2 000 casos de los 1 500 que describen experimentos con Cs y Sr; los restantes se refieren a otros 16 radioelementos. La información consiste en datos que caractericen las fases sólida, líquida o gaseosa involucrada en el experimento, así como los parámetros adicionales correspondientes a las condiciones experimentales o a los datos de campo en las experiencias *in situ*.

La fase absorbente (sólida) se clasifica en razón a su naturaleza y origen, almacenándose los análisis químicos completos (hasta 27 componentes y descripciones mineralógicas, hasta en 40 minerales). También están almacenados datos de porosidad, capacidad de intercambio iónico y datos de formación de complejos superficiales.

Los datos de la solución en la que puede encontrarse el radioelemento comprenden pH, eH, conductividad eléctrica, temperatura y concentraciones de doce solutos importantes y 30 menos importantes aparte de los trazadores de interés. Aproximadamente la mitad de los experimentos realizados para la base de datos se hicieron con agua destilada como solución, el resto en aguas naturales o simulación de subterráneas.

El acceso a esta base de datos es, evidentemente, de la máxima importancia para cualquier país u organización que quiera hacer una eva-

luación correcta de un emplazamiento como almacenamiento de residuos radiactivos. Una posibilidad que hay que incluir en el informe de seguridad correspondiente es el análisis del transporte y emigración de los radioisótopos a través del entorno geológico circundante, para el caso de que un accidente natural o artificial rompiera las barreras incorporadas al repositorio y dejara en libertad una cierta cantidad de radioelementos. Evidentemente, la capacidad de los materiales geológicos circundantes para retener por adsorción a dichos radioelementos es de importancia capital en este contexto.

Por otra parte, este proyecto está estrechamente relacionado con otros como el Hidrocoin (Análisis y modelación de flujos subterráneos de aguas), el SYVAC (Análisis probabilístico del riesgo de un emplazamiento) y el STRIPA (Experimentos *in situ* para desarrollo de herramientas y caracterización de materiales geológicos).

#### • **Situación nacional**

Por su propia naturaleza, el ININ tiene en estos temas, un interés evidente, puesto que constituyen la herramienta moderna más poderosa para la evaluación correcta de repositorios. Por otra parte, los proyectos citados en general y el ISIRS, en particular, están albergados en la NEA de OCDE organismo al que México pertenece, por lo que su participación aparte de conveniente sería fácil. De la misma manera la CNSNS, organismo que habrá de dar las licencias correspondientes para la elección de emplazamiento, construcción y explotación, debe estar muy interesada en este proyecto, cuya parte informática puede ser gestionada por el ININ. Desde luego el ININ debe contar con supercómputo.

Obviamente las empresas de ingeniería y construcción que hayan de participar de alguna manera en los proyectos de repositorios nacionales, lógicamente han de estar interesados en este proyecto.

#### **Banco termoquímico de datos**

La mayoría de los países de OCDE consideran el almacenamiento en formaciones geológicas profundas como la opción preferida para el aislamiento a largo plazo de los residuos de alta radiactividad. Este procedimiento consta de una serie de barreras de protección, a saber: en primer lugar el propio empaquetamiento y matriz en la que se embebe el material radi-

activo, el repositorio propiamente dicho, y en tercer lugar el entorno geológico, que en definitiva, y a muy largo plazo, sería quien impidiese la emigración de los radionucléidos a la biósfera.

El agua es un protagonista esencial, en cualquier escenario creíble, como agente de transporte de materiales radiactivos desde el repositorio, y en estas circunstancias las interacciones químicas con la barrera geológica detendrán, o al menos retardarán sustancialmente (con la correspondiente ventaja debida a la desintegración) la incorporación de los radioelementos al ecosistema. Por consiguiente, el ser capaz de modelar a base de "software" el proceso completo de emigración es de la máxima importancia en la evaluación del riesgo del repositorio.

Uno de los modelos más utilizados se basa en el uso de los coeficientes de distribución, parámetro empírico definido como la razón entre los contenidos del radioelemento en cuestión en la solución en el agua subterránea y fuera de ella (normalmente en volumen asociado de roca). La incorporación desde la solución a la roca se realiza en general mediante procesos de adsorción o de intercambio iónico.

La medida de estos coeficientes se realiza en laboratorios, tratando de simular lo más exactamente posible las funciones determinantes de los procesos en cuestión como la acidez de la solución, el potencial de oxidación-reducción, la composición del soluto y las características de adsorción de los minerales.

### • *Situación internacional*

En 1980 el Comité de Gestión de Residuos Radiactivos de la NEA decidió construir un banco de datos relativo a los procesos mencionados, estableciendo el proyecto ISIRS, en el que participaron desde el principio Alemania, Canadá, Estados Unidos, Finlandia, Inglaterra, Holanda, Italia, Japón, Suecia y Suiza). Inicialmente el Battelle Pacific Northwest Laboratories (EEUU) se ocupó del banco de datos, que en una segunda fase se transfirió a la NEA. En una tercera fase tendrá lugar la utilización rutinaria de esta facilidad. En el momento actual consta de 2 500 coeficientes de distribución para 18 elementos en 8 tipos generales de entornos geológicos.

Igualmente la termodinámica química permite conocer la transferencia de masa en las reacciones químicas y en las interacciones agua-roca, y más específicamente la transferencia entre soluto y solución, el intercambio isotópico y otros mecanismos de retardo, en estos análisis, cuyos datos

son las condiciones fisicoquímicas y el tipo de reacciones químicas que puedan ocurrir, se pueden utilizar códigos de cálculo (WATEQ y PHEEQE) con la ayuda del correspondiente banco de datos como el existente en la NEA desde 1983, que incluye información sobre Uranio, Plutonio, Neptunio, Americio, Cesio, Estroncio, Radio, Tecnecio, Yodo y Plomo.

#### • **Situación nacional**

México vía CFE e ININ, está prestando una atención prioritaria al tema de almacenamiento de los residuos radiactivos. Proponemos la creación de una empresa gubernamental con este fin, ello permitiría al gobierno no sólo el almacenamiento seguro de los residuos radiactivos, sino el de reducir la probabilidad de daños a terceros.

Recomendamos también la modificación al Código Penal, en la parte que corresponde a "Cobertura por riesgos en accidentes nucleares y radiológicos". Su característica sería la de una Empresa Nacional de Almacenamiento de Residuos Radiactivos (ENARR). Para esta empresa de nueva creación, el objetivo sería no solamente llevar a cabo un proyecto a nivel nacional, sino participar en los de nivel internacional existentes, como el mencionado o el PAGIS de la Comunidad Europea. En tal caso se trataría solamente de una actividad de "software" típica de oficina de ingeniería.

### **Almacenamiento de elementos combustibles irradiados**

Los elementos combustibles tienen un tiempo de permanencia en el núcleo de las centrales nucleares relativamente breve (aproximadamente tres años en los LWR.)

Transcurrido este tiempo se extraen del reactor y debido a su alta radiactividad y a su contenido en U-235 y Plutonio, se someten a uno o más de los siguientes procesos:

- Almacenamiento en la piscina del reactor;
- Almacenamiento en seco; y,
- Reelaboración.

El almacenamiento en piscinas tiene limitaciones no sólo por la capacidad de éstas sino por la corrosión que sufren las vainas en contacto con el agua.

En cualquier caso, el almacenamiento de los combustibles irradiados es una situación transitoria ya que no se ha aprovechado más allá del uno por ciento del potencial energético del material combustible, quedando sin aprovechar el Plutonio, material necesario en la línea de los reactores reproductores rápidos.

#### • *Situación internacional*

La situación internacional es muy variada. En Europa los países con los programas nucleares más relevantes están decididos por la explotación de los reactores reproductores rápidos y, en consecuencia, tienen decididos programas de reelaboración. En los Estados Unidos la situación está más desarrollada y a partir de 1995, el mundo ha conocido la nueva filosofía de actuación que ha de llevarse a efecto en este tema.

#### • *Situación nacional*

De acuerdo con las previsiones del PNME 90-94 el número de reactores del parque nuclear mexicano se sitúa en dos de agua ligera (LWR).

En la Ley Nuclear se han establecido los planes de gestión del combustible a corto y mediano plazo.

A corto plazo la Central de Laguna Verde ha incrementado la capacidad de almacenamiento en piscinas mediante una distribución compacta. A mediano y largo plazo está previsto en principio el almacenamiento en seco.

La saturación de las piscinas para los reactores se estima que se alcanzará en las fechas indicadas en la Tabla 2. A partir de este momento será necesario el almacenamiento en seco, la construcción de piscinas adicionales o la reelaboración si se decidiera tal cambio de filosofía.

**Tabla 2**

#### **Saturación de piscinas de almacenamiento**

<b>Central Nuclear</b>	<b>Año en que se estima la saturación de la piscina</b>
LV-1	1997
LV-2	1998-1999

En México debe existir un proyecto para el desarrollo de un contenedor en seco en el que participen el ININ y CFE.

El prototipo elegido debe ser capaz de albergar por lo menos a 17 elementos combustibles del tipo BWR. Los cálculos han de basarse en un combustible con 3.5 por ciento U-235 de enriquecimiento inicial y un quemado máximo de 40 000 MWd/tU.

De acuerdo con las regulaciones del OIEA, el material del contenedor se ha de elegir en base a su tenacidad, que requiere una elevada ductilidad a bajas temperaturas (-40 °C). El material, hierro nodular, ha de desarrollarse por el ININ según especificaciones de CFE y CNSNS, que son quienes deben realizar el diseño mecánico y el procedimiento de fabricación.

En la actualidad se requiere disponer de un prototipo a escala reducida (1:2), para el cual han de realizarse los cálculos de criticidad y térmicos basados en una producción de calor gamma de 17 kW más la radiación solar. Además el contenedor debe resistir un fuego que produzca 800 °C durante 30 minutos, según normas del OIEA. Deben utilizarse diferentes códigos de cálculo para la predicción del ensayo de caída desde nueve metros y diseño de los cierres de las tapas.

Las actividades que aún están pendientes son:

- Construcción de una instalación para el ensayo de caída. Ensayo de un prototipo a escala real;
- Segunda serie de ensayos térmicos;
- Diseño detallado del cestillo para soportar los elementos combustibles; y,
- Fundición de otros prototipos a escala, incluyendo uno a escala real.

A más largo plazo será necesario que las autoridades decidan sobre el almacenamiento definitivo de los elementos combustibles quemados o la posibilidad de proceder a su reelaboración.

## **Efectos biológicos de la radiación**

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes sobre la salud de las poblaciones humanas han sido objeto de estudio desde hace varias décadas; ya en 1930 existían instituciones con responsabilidad en este campo, por ejemplo, la International Commission on Radiological Protec-

tion (ICPR) y el National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP).

Los años de investigación transcurridos desde entonces, han permitido establecer que para el conjunto de la población el riesgo de la radiación ionizante de bajo nivel no debe constituir motivo de mayor preocupación que el derivado de otro tipo de exposiciones, por ejemplo, de origen químico. Además, es procedente destacar que los seres humanos estamos expuestos a radiaciones ionizantes de bajo nivel, de origen natural, durante toda la vida. En efecto, este tipo de radiación contribuye con aproximadamente el 50 por ciento de la exposición total a que estamos sometidos (estimada como dosis anual colectiva, en aproximadamente 4 000 000 sievert persona). El otro 50 por ciento, de origen artificial, se distribuye en aproximadamente un 43 por ciento debido a la utilización de radiaciones con fines médicos, y prácticamente el resto a residuos de armas nucleares, incremento tecnológico de la radiación natural y productos de consumo, estimándose en 0.1 por ciento el que tiene origen en la utilización de la energía nuclear.

La posibilidad de que las dosis bajas de radiación indujeran cáncer se planteó a partir de la década de 1950, aunque era bien conocido desde prácticamente 1900, por la utilización de la radiación X que las dosis altas eran causa de tumores. En un principio se estimó como probable la existencia de una correlación quizás lineal entre la incidencia del cáncer y la dosis absorbida, sin que existiera un umbral. Esta misma idea sigue vigente actualmente en relación con los efectos genéticos, aunque para los no hereditarios, inducidos por niveles altos de radiación, si esté aceptada la existencia de un umbral.

Si bien una parte de los esfuerzos de investigación se dedican al estudio de los efectos no hereditarios, denominados no escolásticos, y cuya gravedad depende de la dosis y de la sensibilidad de los tejidos a la radiación, el énfasis investigador se centra en los trastornos hereditarios y efectos cancerígenos debidos a las bajas dosis de radiación. En este sentido se estudian las lesiones celulares producidas por la radiación como resultado de los cambios moleculares originados por los iones y radicales libres que la misma induce, y entre las moléculas a las que se dedica una mayor atención está el DNA, por ser el portador de la información genética.

Las radiaciones con baja transferencia lineal de energía (X y gamma, por ejemplo) producen fundamentalmente roturas en el DNA, mientras que las de alta transferencia lineal de energía (nucleones y partículas alfa) producen daños de mayor importancia. Aunque existen mecanismos de repa-



ración del DNA que atenúan estos efectos, a veces introduciendo mutaciones, las lesiones no reparadas o mal reparadas pueden transmitirse a las células viejas, lo que hace centrar la atención en las agresiones sufridas por los genes y los cromosomas.

Algunas investigaciones en este campo sugieren que la dosis requerida para duplicar la frecuencia natural de aparición de aberraciones cromosómicas es del orden de 0.05 Sievert, aproximadamente 60 veces superior a la dosis natural de fondo.

También se ha estudiado la acción mutagénica de las radiaciones en múltiples especies, deduciéndose que la dosis necesaria para duplicarse la tasa espontánea en mutación en humanos podría oscilar entre 0.2 y 0.5 Sievert. Todos estos resultados son, además de aproximados, controvertidos, y no serán auténticamente fiables hasta que no se disponga de un conocimiento mucho más exacto de los mecanismos implicados en la generación de cáncer por radiación.

Actualmente, sin embargo, se atribuyen a la misma el 2.5 por ciento del total de los tumores y su distribución, en función del origen de la radiación, es proporcional a la fracción que a cada origen corresponde de la exposición total recibida por la población.

Internacionalmente los efectos biológicos de las radiaciones se estudian en universidades y centros de investigación, aunque sean de entre estos últimos los especializados en investigación nuclear los que hayan dedicado una mayor atención a esta disciplina.

La temática inicialmente incluida en la radiobiología se ha incrementado constantemente dando lugar a especializaciones diversas como mutagénesis, carcinogénesis, mecanismos de reparación del DNA, etcétera, y a numerosísimos grupos dedicados a ellas, lo que hace difícil una estimación de la cantidad total de las inversiones que la comunidad internacional dedica al tema.

Entre las líneas de investigación más generalizadas, aunque una descripción completa requiera una mucho mayor extensión que la de este informe, se pueden citar las siguientes:

- Carcinogénesis producidas por radiaciones a bajas dosis y bajo LET;
- Estudios a nivel molecular y celular, combinados con análisis de irradiación de animales y seguimiento de poblaciones humanas irradiadas;



- Efectos genéticos y naturaleza de las lesiones genéticas;
- Estudios a nivel de organismos completos;
- Mecanismos básicos implicados en tal respuesta de los sistemas biológicos a las radiaciones; y,
- Sistemas de transporte biológico de los radionucleidos.

En México el tema es de interés para la CNSNS, para CFE y sobre todo para el ININ como organismo público investigador de soporte en temas nucleares y radiactivos. En el ININ se ha llevado a cabo investigación en la disciplina desde hace décadas y actualmente se deben desarrollar tres proyectos de investigación, dos de ellos que estudien el efecto de la radiación a nivel celular y otro a nivel molecular, aunque en parte de los mismos las agresiones radiactivas están consideradas dentro del grupo genérico de agresiones ambientales.

## EXPOSICION A CAMPOS ELECTROMAGNETICOS Y SU ASOCIACION CON LEUCEMIA EN NIÑOS

Arturo Fajardo Gutiérrez

Leora Velásquez Pérez

Unidad de Investigación Médica en Epidemiología Clínica

Hospital de Pediatría, Centro Médico Nacional Siglo XXI

Instituto Mexicano del Seguro Social

José Antonio Martínez Méndez

Luz y Fuerza del Centro

### Resumen

Dentro de las neoplasias en los niños la leucemia es la más frecuente en países de Europa y de América. No se conocen las causas de su desarrollo, pero desde 1979 se ha señalado que la exposición a los campos electromagnéticos puede ser una de las causas de su etiología.

*Campos electromagnéticos:* los campos electromagnéticos (CEM) son ubicuos o sea se encuentran en prácticamente todos los lugares en donde vive el hombre. Pueden ser ionizantes o no ionizantes, los CEM que producen las líneas eléctricas (transmisión o distribución) son no ionizantes y por su frecuencia se les conoce como CEM de frecuencia extremadamente baja. No todas las personas están expuestas a la misma cantidad de CEM, de ahí que se señale la existencia de gradientes de exposición a los CEM; el gradiente de exposición está en relación directa con el tipo de cable, el voltaje, la corriente que llevan y la distancia a la cual viven los individuos. Por lo tanto mientras más cerca vivan los individuos a cables eléctricos estarán más expuestos a este tipo de CEM.

*Efectos biológicos de los CEM:* dentro de los mecanismos biológicos que producen los CEM en organismos vivientes se encuentran:

- a) Alteraciones del flujo de calcio en el tejido cerebral del pollo;
- b) Cambios en ritmo circadiano de diferentes especies;

- c) Cambios en la frecuencia cardiaca de los humanos;
- d) Diminución de la secreción de melatonina por la glándula pineal;  
y,
- e) Otros.

*Leucemia y CEM:* la asociación entre leucemia y la exposición a CEM fue señalada por estudios epidemiológicos iniciados en 1979, pero en la actualidad esta asociación es una controversia, ya que no todos los estudios muestran consistencia en sus resultados, algunos son positivos pero otros no. El riesgo relativo que se ha encontrado varía entre 1.5 y 3.0 y sólo dos estudios han encontrado gradiente dosis respuesta.

*Estudios epidemiológicos realizados en México:* en México sólo existen dos estudios epidemiológicos que han estudiado la asociación entre la exposición a CEM y leucemia en niños. El estudio mejor realizado desde el punto de vista metodológico encontró un riesgo relativo de 1.5.

*Conclusiones:* aún no se conoce con certeza si la exposición a CEM puede considerarse o no un factor de riesgo para la leucemia.

## **Introducción**

La leucemia es una enfermedad del tejido hematopoyético y consiste en un crecimiento desordenado de los leucocitos. Lo cual ocasiona diferentes trastornos dentro del organismo humano, en donde cabe destacar la presencia de anemia, sangrados a diferentes niveles de la economía y crecimiento de diferentes órganos como son los ganglios linfáticos, el hígado y el bazo<sup>1</sup>.

Dentro de las neoplasias en los niños, en países de Europa, Asia y América las leucemias ocupan el primer lugar de presentación, representan entre el 30 y 40 por ciento de todas las neoplasias y la leucemia linfoblástica aguda ocupa el 80 por ciento de todos los subtipos histológicos<sup>2</sup>. La incidencia es diferente según el país que se estudie, en general<sup>3</sup> se encuentra entre  $15 \text{ y } 50 \times 10^6$ .

La tendencia al incremento de las neoplasias en los niños es inconsistente, ya que en algunos países se encuentra una tendencia muy clara, pero en otros países no se ha establecido con precisión esta tendencia. Sin embargo, en relación con la leucemia en la mayoría de los estudios se ha encontrado una tendencia al incremento<sup>2</sup>.

En México, no existen estudios relacionadas con las neoplasias en

los niños a nivel nacional, sin embargo en estudios realizados en niños residentes del Distrito Federal durante el período de 1982 a 1991 se encontró para la leucemia una tendencia al incremento; la incidencia para el año de 1982 fue de 8.68 y para 1991 de 23.38 (tasas  $\times 10^6$ ;  $r = 0.94$ ;  $P < 0.01$ ); el tipo de leucemia más frecuente fue la leucemia linfoblástica aguda y la única que presentó tendencia al incremento<sup>3</sup>. Asimismo, la incidencia en niños también residentes del Distrito Federal pero exclusivamente derechohabientes del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS)<sup>4</sup> para los años de 1992 y 1993 fue de 36.4 (tasa  $\times 10^6$ ).

### **Campos electromagnéticos**

Los campos electromagnéticos (CEM) son ubicuos o sea se encuentran en cualquier lugar donde el hombre habita. Se producen en forma natural y por fuentes creadas por el mismo; el eje de la tierra en sí es la fuente natural más grande de campos magnéticos y el relámpago la fuente natural del campo eléctrico. Las fuentes productoras de CEM en el domicilio de los individuos incluye el cableado eléctrico de las casas (Tabla 1), los diferentes aparatos eléctricos y las líneas eléctricas que surten de energía eléctrica a las poblaciones. En general puede señalarse que se presentará un CEM cuando esté operando una corriente eléctrica o un cable eléctrico<sup>5</sup>.

La radiación electromagnética puede dividirse en radiación ionizante y no ionizante; los CEM que nos interesan son los producidos por las líneas eléctricas los cuales producen radiación de tipo no ionizante y dentro del espectro electromagnético se clasifica como radiación de frecuencia extremadamente baja (50 a 60 Hertz)<sup>6</sup>.

Los campos eléctricos y magnéticos están íntimamente ligados, los primeros se miden en volts o kilovolts por metro; los segundos pueden medirse utilizando la fuerza del campo magnético en amperes por metro (A/m) o más comúnmente midiendo la densidad del flujo magnético en unidades de Gauss (G) o tesla (T). Para las exposiciones que nos interesan son más prácticas las mediciones en miliGauss (mG) y se conoce que un mG es igual a 0.1 microtesla (T)<sup>7</sup>.

Se sabe que los CEM disminuyen con la distancia y más específicamente con el cuadrado de la distancia. O sea cuando una persona se encuentra cerca de una fuente de producción de CEM, la exposición que tendrá dependerá de la distancia que tenga a la misma, mientras más cerca mayor exposición y viceversa<sup>7</sup> (Tabla 2).

Tabla 1

**Codificación del cableado según el esquema de  
Wertheimer/Leeper y densidad de flujo magnético  
mG**

Estado	Configuración del cableado	Número de mediciones	Fuerza del campo mG	
			Media	Mediana
Denver	Subterráneo	133	0.5	0.3
	Muy baja	27	0.5	0.3
	Ordinariamente baja	174	0.7	0.5
	Ordinariamente alta	88	1.2	0.9
	Muy alta	12	2.1	0.9
Seattle	Muy baja	3	0.7	0.6
	Ordinariamente baja	9	0.7	0.6
	Ordinariamente alta	9	1.3	1.1
	Muy alta	4	2.2	2.0

Fuente: Savits, D. A., *Case-control Study of Childhood Cancer and Residential Exposure to Electric and Magnetic Fields*, Final Report to the New York State Department of Health, Power Lines Project 218217, 1987.

Kaune, W. T., R. G. Stevens, N. J. Collahan, et. al., *Residential Magnetic and Electric Fields Measured Over 24 hours Periods*, Final Report to the New York State Department of Health, Power Lines Project, 1987

Tabla 2

**Esquema modificado para clasificar la exposición a  
campos electromagnéticos (CEM) según el tipo de  
línea eléctrica y la distancia al domicilio\***

	Distancia del domicilio m	Clasificación de la exposición a CEM
a) Transmisión	20	Alta
b) Primarios de tres fases	20	
a) Transmisión	46	Media
b) Primarios de tres fases	46	
c) Expansiones secundarias	26	
Configuraciones no incluidas en ninguna de las dos categorías anteriores		Baja

\* Esquema de Wertheimer y Leeper modificado por D. A. Savitz y W. T. Kaune, *Environ Health Perspect* 1993;101:76-80

Como se ha señalado brevemente, los campos eléctricos y magnéticos son diferentes, pero la diferencia más importante radica en que los campos eléctricos se distorsionan fácilmente por la presencia de diferentes materiales como son edificios, madera, vidrio, metales, etcétera. En cambio los magnéticos atraviesan casi todos los materiales y es muy difícil defenderse de ellos. Por ello se señala que cuando hablamos de la exposición a CEM, en general nos referimos a los efectos que causan los campos magnéticos<sup>6</sup>.

## **Campos electromagnéticos y cáncer**

### *a) Cáncer en los niños*

Se han señalado diversos efectos asociados a la exposición de los CEM en la salud de las poblaciones; dentro de los cuales se encuentra la asociación con cáncer en los niños y adultos, efectos sobre la reproducción con énfasis en el desarrollo de resultados adversos del embarazo (abortos y malformaciones congénitas), así como hipersensibilidad a la electricidad y reacciones neuroconductuales<sup>8</sup>. Sin embargo, lo que más ha llamado la atención es su relación con el cáncer.

En los años 60's por estudios realizados en Rusia se reportó que los operadores de subestaciones eléctricas presentaban ciertos síntomas neurológicos, cardiovasculares, así como cambios temporales en la composición de las células sanguíneas, los cuales fueron relacionados con la exposición a CEM. Pero estudios posteriores realizados en otros países no verificaron los hallazgos encontrados en Rusia y el interés en los CEM disminuyó<sup>8</sup>.

Sin embargo, al final de los 70's e inicio de los 80's el interés en los CEM resurgió con la publicación de estudios realizados en Estados Unidos de América, en donde se asociaba a la exposición de los CEM producidos por las líneas eléctricas con el desarrollo de cáncer en niños y también a la presencia de leucemia y tumores del cerebro en trabajadores con ocupaciones relacionadas con la electricidad<sup>9</sup>.

El primer estudio sobre cáncer en niños fue realizado por Wertheimer y Leeper en 1979; se trató de un estudio de casos y controles realizado en Denver, Colorado, que incluyó a 344 niños que murieron de cáncer, los cuales se compararon con igual número de controles seleccionados de certificados de nacimientos. La residencia de casos y controles se evaluó con

respecto a su cercanía a las líneas eléctricas y el grosor de los cables. Ambas poblaciones se estratificaron de acuerdo a un sistema de configuración de cableado y se clasificaron como "configuración de alta corriente" o "configuración de baja corriente", dependiendo del tipo de cable, grosor del mismo y cercanía de la casa a las líneas eléctricas<sup>10</sup>.

Aunque la razón de momios (OR) (estimador del riesgo relativo) no se presentó en el artículo original, se estimó una OR de 2-3 con los datos que se presentaron. Esto sugirió, que los niños cuyas casas fueron clasificadas como casas con configuración de alta corriente, tuvieron un incremento de dos o tres veces más riesgo de morir de cáncer comparado con los niños cuyas casas fueron clasificadas como casas con configuración de baja corriente.

En el estudio no se realizó entrevistas a los padres de los niños, por lo que sólo se pudo evaluar como posibles variables de confusión a la edad, sexo, residencia urbano/rural, clase social, edad materna, orden al nacimiento y densidad de tráfico; pero no se encontraron datos de que alguna de las variables fuera una variable de confusión en la asociación encontrada. Estos hallazgos se relacionaron con todos los tipos de cáncer y no exclusivamente con leucemia<sup>9</sup>.

Ha habido críticas que han cuestionado lo adecuado o inadecuado de la codificación del cableado como forma de evaluar la exposición de los campos magnéticos, y se ha señalado que esta forma de evaluación de la exposición a los campos magnéticos es una variable proxy imperfecta. Sin embargo, es necesario puntualizar que si la codificación del cableado es una pobre evaluación de la exposición para campos magnéticos tanto para casos como para controles, Wertheimer y Leeper debieron haber subestimado el verdadero efecto de los campos magnéticos más que sobrestimarlo.

La crítica más plausible en relación a una asociación positiva espúrea, es la presencia de algún sutil sesgo en la asignación de las casas, lo cual se debió a que los investigadores no tuvieron fondos económicos para realizar el estudio y ellos mismos fueron los que recolectaron los datos y sabían quién era caso y control<sup>10</sup>.

La codificación del cableado como evaluación de la exposición a campos magnéticos se basa en varios supuestos. Primero, se asume que al examinar las características de las líneas eléctricas, es posible realizar evidencias válidas acerca de la corriente que fluye a lo largo de determinadas líneas, dado que esto está determinado por el número de fases de los

cables, su grosor, la localización de los transformadores y los servicios que dan a diferentes casas. Después de estimar el flujo de corriente basado en los atributos de los cables y la distancia de las casas a las líneas eléctricas puede establecerse una asignación del código de cableado.

Debe señalarse que todos los estudios se han enfocado en la codificación de los cables externos que se encuentran cerca de las casas, lo cual implícita o explícitamente se relaciona sólo con la exposición a campos magnéticos más que con los campos eléctricos, por la facilidad con la cual el hombre puede protegerse de los campos eléctricos como se mencionó anteriormente.

Estudios posteriores en Seattle y Denver<sup>6</sup>, confirmaron que efectivamente el código de cableado diseñado por Wertheimer y Leeper predecía los campos magnéticos en la casa, a pesar de que fuera un marcador imperfecto de la exposición.

Posteriormente Kaune y Savitz señalaron que había poca distinción entre los códigos de la clasificación más baja (cables enterrados y los de muy baja y ordinariamente baja corriente) y había un salto en la configuración de corriente ordinariamente alta y otro en los cables de muy alta configuración de corriente, por ello modificaron la clasificación de cinco clases a sólo tres clases (alta, media y baja configuración de cableado)<sup>11</sup>.

Posteriormente se realizaron diferentes estudios sobre cáncer en la niñez y exposición a campos magnéticos en la casa. Fulton y col. reportaron una ausencia de asociación entre la exposición a CEM y leucemia en Rhode Island<sup>12</sup>; pero Wertheimer y Leeper criticaron su trabajo, señalaron que había diferencias entre el período en que los casos y los controles habían ocupado sus casas y al ajustar por esta diferencia se produjo un modesto incremento en el riesgo asociado al código de cableado<sup>13</sup>.

Myers y col. realizaron un estudio en Inglaterra<sup>14</sup>, en donde se evaluó la cercanía de las casas a las líneas eléctricas y se calculó los campos magnéticos a los que la población estudiada estuvo expuesta. Se comparó niños con leucemia como casos y niños con tumores de los tejidos sólidos como controles. En general una exposición elevada fue muy rara, pero hubo una mayor proporción de casos con exposiciones altas en comparación de los controles.

Tomenius realizó un estudio en Estocolmo relacionando la exposición a campos magnéticos y cáncer en los niños<sup>15</sup>. Fue el primero que midió la cantidad de campo magnético en las casas y señaló la presencia de construcciones eléctricas externas. Encontró un mayor riesgo de tumores cere-



brales en los niños asociado con una exposición por arriba de 3.0 mG (mili-Gauss) y con la cercanía a construcciones eléctricas, la relación con las leucemias fue nula o inversa.

En otro estudio también llevado a cabo en Denver por Savitz y colaboradores<sup>16</sup>, se evaluó la exposición a los CEM realizando tanto mediciones de los campos magnéticos en las casas de la población de estudio y mediante la configuración del cableado externo que existía en las casas. Las mediciones se hicieron en condiciones de bajo consumo eléctrico dentro de la casa, en un intento de aislar la contribución de la exposición de las líneas eléctricas externas y en condiciones de alto consumo eléctrico, con aparatos y luces encendidas dentro de la casa. No se encontró asociación con la medición de los campos eléctricos y magnéticos. Pero los códigos de cableado de alta corriente fueron más frecuentes en las casas de los casos, cuando se comparó la población con alta configuración de cableado contra la población con baja configuración el OR fue de 1.5 (IC95% 1.0-2.3); para los casos con leucemia fue de 2.3, para los tumores de cerebro de 2.0 y para los linfomas de 0.8, aunque hubo imprecisión en sus intervalos de confianza.

En otro estudio realizado por London y colaboradores, de la Universidad del Sur de California<sup>17</sup>, se corroboró los resultados anteriores, no se encontró asociación con la medición de los CEM pero sí con la configuración del cableado externo de las casas. En este estudio se comparó a 232 niños con leucemia con igual número de controles residentes de Los Angeles, se encontró un OR de 2.15 (IC95% 1.08-4.28), en los niños que vivían en casas con una alta configuración de cableado al compararlos con niños en donde la configuración del cableado era baja. En este estudio además hubo tendencia de la asociación, o sea el OR aumentó mientras más cercanía había de la residencia a los cables eléctricos.

Ahlbom<sup>18</sup>, resumió los diferentes estudios epidemiológicos relacionados con la asociación entre la exposición a campos magnéticos y cáncer y los OR puntuales estuvieron por arriba de uno pero no más allá de 2.5 con mucha imprecisión de la estimaciones porque los intervalos de confianza fueron muy amplios. La asociación para las leucemias mostró menos consistencia en comparación de los resultados para tumores del sistema nervioso central en donde el riesgo fue mayor. Para los diferentes subtipos de cáncer la imprecisión es más marcada. Sin embargo el estudio de London en Los Angeles mostró mayor precisión para la asociación con leucemias.

En otro estudio realizado por Feychting y Ahlbom<sup>19</sup>, en donde la eva-

luación de la exposición se realizó mediante la medición puntual de la exposición utilizando docímetros, se estimó la cantidad de CEM a la que había estado expuesta la población y además se utilizó el esquema de código del cableado, no se encontró asociación con la medición puntual, pero si cuando se evaluó con la estimación de la exposición (OR= 2.7; IC95% 1.0- 5.3) y cuando se comparó la distancia de la casa a las líneas eléctricas (OR= 2.9; IC95% 1.0-7.3).

En este estudio, al igual que en el de London, se encontró tendencia en la asociación, el riesgo aumentó conforme se vivía más cerca a líneas eléctricas de alta tensión (distancia de 0 a 50 m OR = 2.9, distancia de 51 a 100 m OR = 1.1 y distancia de 101 y más metros OR = 1).

#### *b) Cáncer en adultos*

Los estudios en los adultos han sido mucho menos consistentes, sólo Wertheimer y Leeper han mostrado una clara asociación entre el código de cableado y los tipos de cáncer.

Por el contrario, McDowall en Inglaterra no encontró asociación con la residencia dentro de los 50 m de una subestación, ni a 30 m de las líneas eléctricas, aunque se ha criticado la definición de exposición que utilizaron. Severson y colaboradores, tampoco encontraron asociación entre la exposición a campos magnéticos (medida la exposición a través del código de cableado y con la medición puntual de los mismos utilizando docímetros) y el desarrollo de leucemia aguda mieloide.

Wertheimer y Leeper reanalizaron los datos de Severson y sugirieron que la exposición más próxima al tiempo del diagnóstico pudo ser relacionada con un incremento de riesgo y que la combinación con la utilización de diferentes aparatos eléctricos con la exposición residencial dio una indicación de una asociación positiva<sup>9</sup>.

Coleman y colaboradores<sup>20</sup> en Inglaterra, evaluó los casos de leucemia en adultos con casos de tumores sólidos y no encontró asociación con alta configuración del cableado, pero encontró que algunos de los casos de leucemia tenían una alta exposición.

Ahlbom<sup>18</sup>, resumió los diferentes estudios realizados en adultos y encontró pobre consistencia de los diferentes estudios en relación con una asociación positiva, aunque hubo limitaciones metodológicas en la mayoría de los estudios como para eliminar claramente la posibilidad de que los cánceres en adultos no sean afectados por los campos magnéticos.

*c) Estudios sobre aparatos eléctricos*

Pocos estudios se han publicado relacionados con el uso de aparatos eléctricos y cáncer (específicamente la utilización de colchas eléctricas y camas de agua). Preston-Martin y colaboradores<sup>23</sup>, no encontraron riesgo entre el uso de colchas eléctricas y el desarrollo de leucemia mieloide, cáncer testicular o cáncer de mama. Sin embargo Savitz y colaboradores<sup>22</sup>, encontraron un modesto incremento del riesgo de cáncer en los niños cuando la madre durante el embarazo o los niños habían utilizado colchas eléctricas. Tampoco se encontró asociación con el uso de camas de agua o relojes eléctricos al lado de la cama de los niños.

*d) Alternativas de interpretación entre la exposición a los CEM y daños en la salud de las poblaciones*

La información anteriormente señalada relacionada con la asociación entre la exposición a campos magnéticos y cáncer en general (niños y adultos) no es suficiente para obtener conclusiones contundentes. La evidencia más importante está dada por la exposición que se presenta en el domicilio de la población y el cáncer en los niños, en donde diferentes estudios han señalado una asociación positiva.

Por otra parte, no existe un error obvio que pudiera estar produciendo un resultado falso positivo. Sin embargo, existen inconsistencias y aún quedan preguntas por contestar para obtener una conclusión definitiva entre la exposición a CEM y cáncer, en donde sólo se ha encontrado asociación entre la residencia cercana a líneas eléctricas, pero no cuando se mide la exposición al medir la cantidad de CEM utilizando docímetros. Por ello se han señalado algunas alternativas de interpretación:

- a) Puede existir algún otro factor, independiente de los campos magnéticos, como el responsable de la asociación encontrada con la configuración del cableado; lo cual incluye agentes diferentes a los CEM o algún parámetro de exposición que no se ha incluido dentro de la medición residencial que se hace de los campos magnéticos; o,
- b) Hay mucho error en la utilización del código de cableado como una medición proxy de la exposición prolongada a los campos magnéticos.

Se ha señalado que los retos deben dirigirse al adecuado control en la selección de los sujetos que fungen como controles y a los problemas con la no respuesta. Los estudios futuros deben dirigirse a estos problemas e identificar las bases espúreas de las asociaciones positivas o incrementar la credibilidad de una asociación causal, demostrando que los errores metodológicos potenciales que se tienen actualmente no han afectado a los estudios realizados. Son necesarios estudios que evalúen la exposición residencial y el cáncer en adultos, así como medir la influencia que tienen los aparatos eléctricos en el desarrollo de cáncer.

*e) Evaluación de la exposición a los campos electromagnéticos*

La epidemiología se ha enfocado más a los daños por exposición prolongada a los CEM que por la exposición transitoria. Las fuentes de exposición prolongada son mucho más circunscritas que las de exposición intermitente.

Debido a la universalidad de los CEM en la población, la evaluación de la exposición es un reto, por ello es importante reflexionar sobre tres características que Savitz<sup>9</sup>, ha mencionado:

1. Los epidemiólogos sólo podemos comparar personas con mucha exposición con personas con poca exposición, no es posible comparar expuestos contra no expuestos, como se hace cuando se evalúa otro tipo de agentes;
2. Debe considerarse una gran cantidad de fuentes de exposición, en donde es difícil señalar una exposición exclusiva en el hogar o en el lugar de trabajo; y,
3. La significancia de los efectos que este agente puede producir en la salud de la población son muy importantes. En forma intuitiva, parece difícil para muchas personas concebir que un agente tan familiar y conocido pueda producir efectos adversos a la salud, pero no existe justificación científica para una perspectiva en donde sólo las exposiciones raras o exóticas puedan producir daños.

Por lo mencionado, la evaluación de la exposición de la población a los CEM ha sido uno de los puntos más difíciles de establecer y más controvertibles; porque se necesita tener un indicador que represente la exposición que los individuos hayan tenido durante toda la vida o durante un

tiempo prolongado. Y debido a la existencia de múltiples fuentes productoras de CEM, no es fácil señalar los diferentes gradientes de exposición, o sea quién está más expuesto, quién regular y quién mínimamente.

Como anteriormente se ha señalado, en los diferentes estudios en donde se ha tratado de encontrar alguna asociación entre la exposición a CEM y los daños a la salud, las formas en que se ha establecido un gradiente de exposición han sido:

- a) Utilizando docímetros y haciendo una medición puntual de la cantidad de CEM que se tiene en los domicilios de las personas y suponer que esa medición indica la exposición que se ha tenido durante toda su vida;
- b) Midiendo por un tiempo más prolongado (una semana) la cantidad de CEM que se tiene y posteriormente estimar la cantidad a la que supuestamente estuvo expuesto un individuo y posteriormente establecer gradientes de exposición en las personas; y,
- c) Estableciendo la exposición en base a código de cableado<sup>6</sup>.

Las dos primeras formas de evaluar la exposición para construir un gradiente de exposición, no se han tomado como las mejores mediciones porque la producción de los CEM no son fijos sino fluctuantes, con lo cual es difícil predecir cuál ha sido la exposición que las personas han tenido durante determinado tiempo<sup>6</sup>.

En relación con la evaluación de la exposición utilizando la configuración del cableado eléctrico (líneas eléctricas de transmisión o distribución), se sabe que la cantidad de los CEM está en relación directa con el voltaje y el flujo de corriente que llevan los cables, lo cual puede establecerse por las características visibles de las líneas eléctricas (grosor de los cables, número de fases que llevan, distancia a los transformadores y número de casas a las que surten de energía) y al determinar la distancia a la cual se encuentren las casas de los individuos, es posible establecer un gradiente de exposición.

Porque la mayor o menor exposición a los CEM está en relación con la cantidad de CEM que producen las fuentes de producción y la distancia a la que se viva de ellas.

Por lo anterior Wertheimer y Leeper establecieron un gradiente de exposición basado en las características visibles de los cables y la distancia a la que vivían los individuos como fue señalado previamente.

## Efectos biológicos: estudios en animales

Se han reportado pocos estudios realizados en animales en donde se haya buscado el efecto de la exposición a CEM. Se ha señalado que de asociarse los CEM con el desarrollo de cáncer, serán factores promotores y no iniciadores. Ha habido inconsistencias en los diferentes estudios, porque un grupo encontró un efecto co-promotor en la piel del gato con la exposición a CEM continuos y otro no, en cambio lo encontró con la exposición intermitente<sup>23</sup>.

Muchos de los efectos biológicos que se han observado en animales expuestos a los CEM parecen asociados directa o indirectamente con el sistema nervioso. En lo referente a alteraciones conductuales, no existen efectos importantes que se hayan demostrado y se piensa que los efectos observados se deben a una detección y percepción de los campos eléctricos por los animales.

En relación con los ritmos biológicos se ha encontrado cierta relación. Uno de los estudios más importantes fue el de Wilson y colaboradores<sup>24</sup>, los cuales estudiaron la producción de melatonina por la glándula pineal en ratas expuestas a CEM (exposición tanto a 1.5 y 40 kV/m) y encontraron una disminución en la producción de esta hormona después de tres semanas de exposición, aunque ha habido inconsistencia de los resultados con otros estudios. Sin embargo, a pesar de la inconsistencia de los diferentes estudios, hay consenso de que la exposición a los CEM produce alteraciones en los mecanismos circadianos de los mamíferos.

En lo relativo a aspectos que tienen que ver con la neuroquímica o neurofisiología, los resultados son poco consistentes. Se señala que los campos eléctricos pueden causar cambios en la función del sistema nervioso central, aunque los cambios parecen ser temporales. Asimismo, los datos neuroquímicos ofrecen débil evidencia de que la exposición a campos eléctricos puedan causar alteración del funcionamiento cerebral. Los experimentos son pocos y se ha cuestionado mucho la validez de los diversos estudios. A pesar de ello, los hallazgos apoyan la hipótesis de que la exposición a los CEM alteran los ritmos internos, incrementan el estado de vigilia en animales y su efecto es transitorio<sup>23</sup>.

En resumen, se han realizado muchos estudios para establecer que efectos produce la exposición a CEM en el sistema nervioso central, pero los resultados son inconsistentes a pesar de que se han utilizado en algunos estudios exposiciones prolongadas y de gran intensidad (100 kV/m y 5 mT).



Los efectos sobre el sistema nervioso central incluye alteraciones de la excitación neuronal, alteración de los niveles de hormonas a nivel de la glándula pineal y aversión conductual o preferencia por un campo. Los efectos más inconsistentes se encuentran en los cambios en las catecolaminas o corticosteroides séricos, morfología del tejido cerebral y de las ondas del EEG. Estos efectos posiblemente son debido a una interacción directa de los campos eléctricos con el tejido o a una interacción indirecta, tal como una respuesta fisiológica propia a la detección o estimulación de receptores sensoriales por el campo. Los mecanismos fisiológicos encontrados son oscuros y es necesario dilucidarlos.

Los efectos de la exposición a los CEM y el desarrollo de problemas durante la reproducción y el desarrollo se ha estudiado en diferentes especies. La mayoría de los estudios en ovíparos se han realizado en pollos, palomas o pájaros y uno de los estudios más interesantes fue realizado por Delgado y colaboradores<sup>25</sup>, el cual observó un incremento muy marcado en la tasa de malformaciones en los huevos de pollos expuestos a niveles bajos de campos magnéticos pulsátiles ( $0.12$  ó  $12 \times 10^{-6}$  T), otros investigadores han reproducido los hallazgos<sup>26</sup>.

En relación con estudios en mamíferos, se ha señalado que la exposición prenatal a los campos eléctricos produce efectos deletéreos en el crecimiento y sobrevivencia postnatal, pero ha habido inconsistencia en los estudios. En general puede concluirse que los estudios realizados para establecer si la exposición a los campos eléctricos y magnéticos afectan la reproducción y el desarrollo son inconsistentes, por lo cual se hace necesario estudios mejor diseñados.

En lo relativo al crecimiento y reparación ósea, también hay controversia entre los diferentes estudios, no se conoce porque los campos eléctricos sinusoidales de 60 Hz causan retardo en la reparación de las fracturas, mientras que los campos magnéticos pulsátiles facilitan la reparación<sup>26</sup>.

En el sistema cardiovascular, se ha encontrado que la exposición a CEM pueden aumentar la tensión arterial y la frecuencia cardiaca, pero los resultados en general son inconsistentes. En lo relativo al sistema inmunológico, algunos estudios sobre la exposición de animales a campos eléctricos (150-250 V/m) no han mostrado cambios en la inmunidad humoral. Sin embargo Lyle y colaboradores<sup>27</sup>, reportaron una disminución significativa de la capacidad citolítica de los linfocitos expuestos a campos de radiofrecuencias modulados a 60 Hz.

En otro estudio utilizando sólo campos eléctricos a 60 Hz se obtuvo una supresión citotóxica de los linfocitos T. La diferencia encontrada entre los diferentes laboratorios, se debe a diferencias en la metodología que han utilizado; Morris<sup>28</sup>, no encontró el efecto señalado, midió la respuesta de los linfocitos en animales expuestos; mientras que Lyle<sup>27</sup>, que sí encontró la respuesta, expuso linfocitos en cultivos.

En contraste con la aparente falta de consistencia entre la influencia de los campos eléctricos sobre el sistema inmune, la inmunorespuesta a mitógenos y antígenos parece ser significativamente susceptible a la exposición a campos magnéticos<sup>26</sup>.

En relación con la carcinogénesis y mutagénesis, no se ha encontrado un efecto directo de los CEM. No se han reportado estudios en donde la exposición a CEM se asocie con el desarrollo espontáneo de tumores. Un posible efecto puede ser un efecto co-carcinogénico, en el cual la exposición a campos magnéticos tenga un efecto promotor y que la actividad carcinogénica comience con un iniciador (radiación química o ionizante). En un estudio realizado por Leung y colaboradores<sup>29</sup>, en donde se expuso a animales a campos eléctricos de 60 Hz por un período prolongado (180 días) y posteriormente se expusieron a un potente iniciador (dimetilbenzoantrazeno a los 55 días de edad), no se encontró incremento en el número de ratas que desarrollaron tumores, sin embargo hubo un incremento en el número de tumores por cada animal.

### **Efectos biológicos: Estudios *in vitro***

En contraste con los estudios realizados en animales, hay un vasto número de estudios realizado *in vitro* en los cuales se ha buscado un mecanismo que induzca los mecanismo de promoción del cáncer cuando se exponen a campos magnéticos. Se han desarrollado diversos modelos y se ha encontrado cambios en la superficie celular y en el transporte del ion calcio a nivel de la membrana celular; ruptura de la comunicación celular, modulación del crecimiento celular mediante la activación de secuencias específicas de genes que influyen en la transcripción del RNA (ácido ribonucleico); disminución de la producción de la melatonina por la glándula pineal; modulación de la actividad de la enzima ornitín descarboxilasa y una posible alteración del mecanismo hormonal y del sistema inmune para el control antitumoral. Cada uno de estos mecanismo tiene aspectos que explican los efectos que los campos magnéticos pueden tener en relación con



el cáncer, sin embargo ninguno está libre de problemas y tienen objeciones esenciales.

Cabe mencionar que últimamente se han descubierto dos mecanismos que han alcanzado una atención especial, los cuales se relacionan con la reducción nocturna de la producción de melatonina inducida por la exposición a campos magnéticos y el descubrimiento de cristales de magnetita en el cerebro humano<sup>8</sup>.

Como anteriormente se ha señalado, existe evidencia de que la exposición a CEM disminuye en la glándula pineal la producción de melatonina, y en estudios recientes se ha determinado que la melatonina es el desintoxicador más potente de radicales libres (-OH) que tiene el organismo, en consecuencia lo libera del daño que producen al DNA. Además, se ha encontrado en voluntarios humanos sanos expuestos a campos magnéticos, disminución nocturna de los niveles de melatonina. Se piensa que si la melatonina se suprime por la exposición a campos magnéticos, el DNA es más vulnerable al ataque oxidativo; esta teoría explica porqué la disminución de la melatonina por la exposición a los campos magnéticos puede incrementar la incidencia de cáncer en cualquier tejido, pero aún se necesita mayor investigación para aceptarla totalmente<sup>8</sup>.

Por otra parte en 1992 Kirschvink JL y colaboradores<sup>30</sup>, encontraron la presencia de cristales de magnetita en el cerebro humano, en cantidades suficientes como para responder a la exposición a campos magnéticos en la casa o en la ocupación.

### **Estudios epidemiológicos realizados en México sobre la asociación exposición a CEM y leucemia**

La evaluación de la asociación entre la exposición a los CEM y el desarrollo de leucemia en niños mexicanos ha sido llevada a cabo en dos estudios, en los cuales se ha estudiado población residente del Distrito Federal.

El primer estudio fue realizado por Fajardo-Gutiérrez y colaboradores<sup>31</sup>, los cuales realizaron un estudio de casos y controles. Se estudió a 81 niños con leucemia, seleccionados y diagnosticados en dos hospitales del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) y se compararon con 77 niños hospitalizados en los mismos hospitales pero sin leucemia. La evaluación de la exposición se realizó tratando de aplicar la codificación del cableado, para lo cual a los padres de ambas poblaciones se les aplicó un cuestionario, en donde se les preguntó sobre la presencia y distancia que

tenían ha diferentes fuentes productoras de CEM (líneas eléctricas de transmisión, distribución, transformadores y subestaciones eléctricas). Sólo se acudió al domicilio de los casos para conocer la presencia de las fuentes de CEM señaladas, pero no pudo medirse en forma precisa la distancia de las casas a las fuentes de producción.

Se encontró un OR de 2.6 (IC95% 1.26-5.34) en relación con la presencia de líneas eléctricas de distribución y de 2.5 (IC95% 0.97-6.67) con las líneas de transmisión y también hubo relación con la distancia.

Aunque este estudio fue positivo para la asociación exposición a CEM y desarrollo de leucemia, tuvo varios problemas metodológicos por los cuales se concluyó que no podía considerarse como definitiva la asociación encontrada. Los principales problemas fueron:

- a) No se midió la exposición a los CEM en forma precisa, porque sólo se preguntó sobre la existencia de fuentes productoras de los mismos y la distancia del domicilio, pero no se midió exactamente la distancia, además de que la evaluación del tipo de cables cerca de las casas no fue realizado por personal experto;
- b) Pudo existir algún sesgo diferencial porque sólo se acudió a los domicilio de los casos, lo cual de alguna manera pudo sobrestimar la asociación (OR) encontrada; y,
- c) Pudo existir un sesgo del observador porque la evaluación del tipo de cables no fue realizada en forma cegada, el personal que hizo la evaluación sabía quién era caso y control.

Con base en el estudio anterior, se desarrolló un segundo estudio durante 1993 a 1996<sup>32</sup>, en donde se trató de eliminar los posibles sesgos que se presentaron en el primero.

De igual forma se realizó un estudio de casos y controles, en el cual se aumentó el tamaño muestral; se estudio a 187 niños con leucemia y se comparó con 187 niños sanos, los cuales fueron seleccionados de las clínicas de adscripción de donde procedían los casos. Con el objetivo de eliminar el posible efecto que podría tener el sexo y la edad, se realizó un pareamiento por frecuencia entre los casos y controles relativo a estas variables.

Los casos fueron también seleccionados de los dos centros médicos que tiene el IMSS para atender a niños con cáncer (Hospital de Pediatría del Centro Médico Nacional Siglo XXI y Servicio de Hematología del Hospital General, Centro Médico La Raza).

En este estudio tanto a los padres de casos y controles se les aplicó un cuestionario con las diferentes variables de estudio y la evaluación de la exposición se realizó también mediante la codificación del cableado. Las características del cableado fue realizada por personal experto (técnicos de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro), los cuales acudieron a los domicilios de los casos y controles, para determinar la presencia de cables eléctricos cerca del domicilio. Se determinó las características de los mismos, así como la distancia que había entre los cables y las casas. La evaluación del tipo de cableado fue realizado sin conocer quién era caso o control (evaluación cegada).

Debido a que se utilizó para la evaluación de la exposición el código de cableado modificado por Kaune y Savitz, se validó en la población de estudio; para ello se obtuvieron 50 mediciones aleatorias para cada estrato señalado (alta, mediana y baja exposición), las mediciones se realizaron entre las 19 y 21 horas y se utilizó un docímetro marca Emdex II, el cual evalúa la presencia de campos magnéticos en miligauss (mG). Los resultados mostraron que efectivamente la mayor presencia de campos magnéticos dependía del tipo de cable y la distancia a la que se estuviera de los mismos. Asimismo, se tomó fotografías de los domicilios y de las fuentes productoras de CEM cercanas al domicilio de los casos y los controles. Se hizo un croquis con los datos anteriores y posteriormente se estableció el tipo de configuración que tenía cada casa (alta, mediana o baja configuración) en forma cegada.

No se encontró diferencia según el sexo y la edad de los niños, así como con la edad de ambos padres. En relación con la exposición a CEM se encontró un OR 1.68 (IC95% 0.95-3.78) cuando se comparó alta exposición con baja exposición y un OR 1.18 (IC95% 0.54-2.59) cuando se comparó mediana con baja exposición. Al comparar alta contra media y baja exposición en forma conjunta el OR fue 1.47 (IC95% 0.95-2.27), el OR no estuvo confundido por la presencia de diferentes variables (Tabla 3).

De este segundo estudio, el cual fue realizado con una metodología mucho más precisa que el primer estudio, se concluyó que los niños menores de 15 años residentes del Distrito Federal tienen un riesgo bajo asociado a la presencia de alta exposición a los CEM.

Por otra parte y tratando de señalar por qué se presentó un riesgo bajo en esta población de estudio comparado con el riesgo que tienen otras poblaciones, se pensó que puede existir un efecto de caja de Faraday, ya que casi todas las casas están construidas con tabiques, cemento y varillas,

y posiblemente protegen a la población de los CEM.

**Tabla 3**

**Resultados**

Variable	Casos (n= 187)	Control (n= 187)	OR	IC95%	P
<b>Exposición a CEM*</b>					
<b>Categoría</b>					
Alta	82	65	1.68	0.95-3.78	0.16
Media	90	102	1.18	0.54-2.59	0.66
Baja	15	20	1		
Alta	82	65	1.47	0.95-2.27	0.07
Media y baja	105	122	1		

\* Campos electromagnéticos

## Conclusiones

¿Qué debemos hacer? ¿Qué podemos hacer?

Las preguntas anteriores son muy importantes y difíciles de contestar, es claro que aún no se cuenta con evidencias completas relativas a un riesgo causado por la exposición a los CEM, cómo y de qué magnitud es. Sin embargo, hay consenso en la comunidad científica de la necesidad de una mayor investigación y de que la mejor decisión hasta ahora es tener una conducta de "evitar prudentemente" la exposición a los CEM mientras no se cuente con suficiente certeza científica<sup>33</sup>.

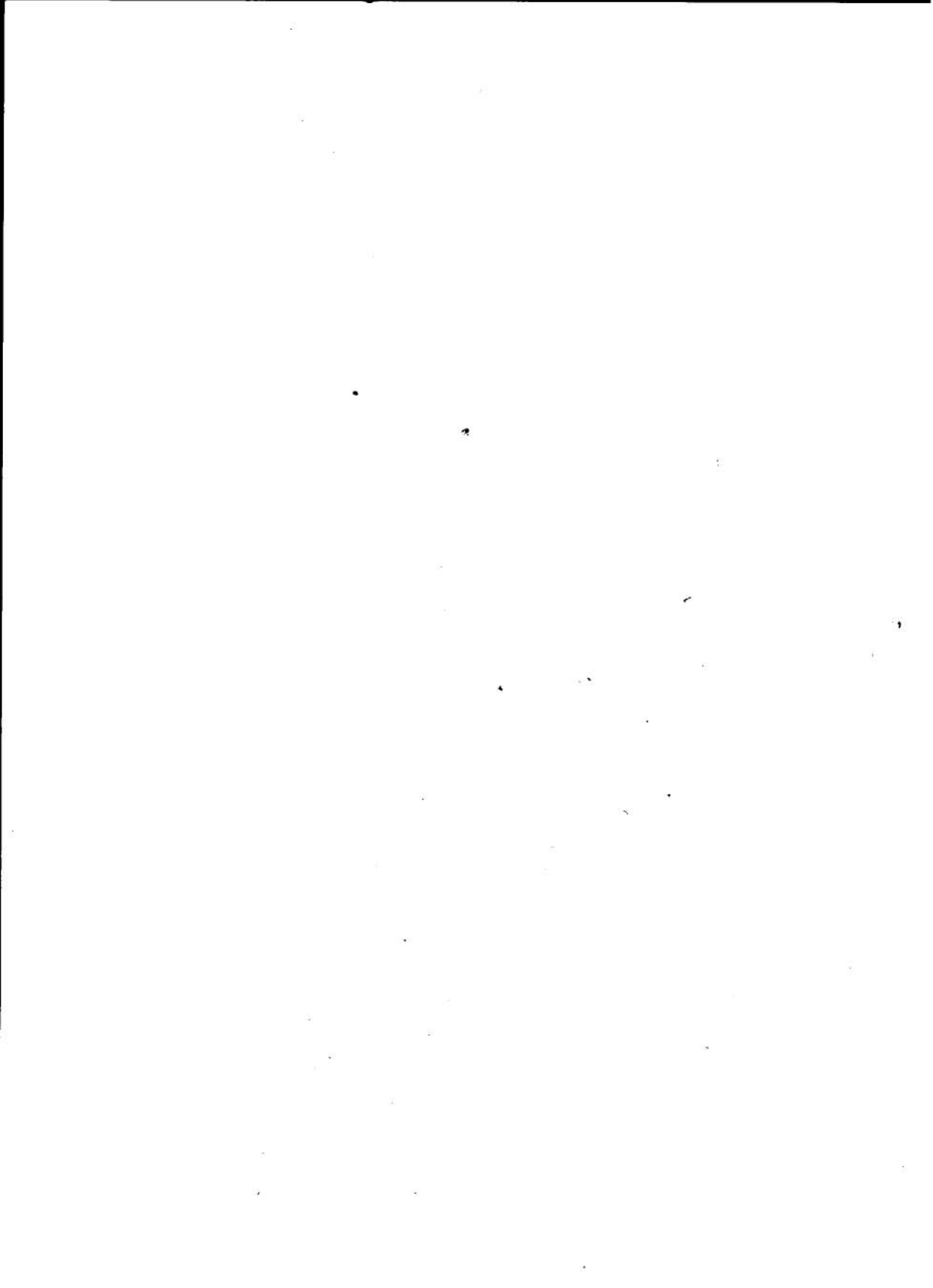
Por otra parte, con el objetivo de minimizar la exposición residencial y ocupacional, se ha señalado una estrategia sistemática de cómo deberían dirigirse o trazarse las futuras líneas eléctricas. Además se están realizando estudios para tratar de diseñar cómo disminuir o eliminar las CEM que producen los diferentes aparatos eléctricos<sup>8</sup>.

## Referencias

1. Poplack, D. G. y G. Reaman, *Leucemia Linfobástica en la Infancia*, *CI Ped N Am* 1988; 4:977-1010.

2. Ross, J. A., S. M. Davies, J. D. Potter and L. L. Robison, *Epidemiology of Childhood Leukemia, with a Focus on Infants*, Epidemiol Rev 1994; 16:243-272.
3. Mejía-Arangur, J. M., A. Fajardo-Gutiérrez, R. Bernaldez-Ríos, J. M. Farfán-Canto, A. Ortiz-Fernández and M. C. Martínez-García, *Incidence Trends of Acute Leukemia Among the Children of Mexico City: 1982-1991*, Arch Med Res 1996; 27:223-227.
4. Navarrete-Martínez, A., M. Reynoso-García y A. Fajardo-Gutiérrez, *Incidencia de las Neoplasias Malignas Durante 1992 y 1993 en Niños Derechohabientes del Instituto Mexicano del Seguro Social Residentes del Distrito Federal*, XV Jornadas de Investigación, Hospital de Pediatría, Centro Médico Nacional Siglo XXI, 1995.
5. *Electric and Magnetic Fields from 60 Hertz Electric Power: What do we Know About Possible Health Risk?*, Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, 1989.
6. Savitz, D. A., E. N. Perace and C. H. Poole, *Methodological Issues in the Epidemiology of Electromagnetic Fields and Cancer*, Epidemiol Rev 1989;11:59-78.
7. Feero, W. E., *Electric and Magnetic Field Management*, Am Ind Hyg Assoc J 1993;54:205-210.
8. Knave, B., *Electric and Magnetic Fields and Health Outcomes: An Overview*, Scan J Work Environ Health 1994;20(special issue):78- 89.
9. Savitz, D. A., *Overview of Epidemiologic Research on Electric and Magnetic Fields and Cancer*, Am Ind Hyg Assoc J 1993;54:197-204.
10. Wertheimer, N., and E. Leeper, *Electrical Wiring Configurations and Childhood Cancer*, Am J Epidemiol 1979;109:273-84.
11. Kaune, W. T. and D. A. Savitz, *Simplification of the Wertheimer-Leeper Wire-coding System*, Environ Health Perspect 1993;11:76-80.
12. Fulton, J. P., S. Cobb, L. Preble, L. Leone and E. Forman, *Electrical Wiring Configurations and Childhood Leukemia in Rhode Island*, Am J Epidemiol 1980;111:292-296.
13. Wertheimer, N. and E. Leeper, *Electrical Wiring Configurations and Childhood Leukemia in Rhode Island, (Letter)*, Am J Epidemiol 1980;111:461-462.
14. Myers, A., A. D. Clayden, R. A. Cartwright and S. C. Cartwright, *Childhood Cancer and Overhead Powerlines: A Case Control Study*, Br J Cancer 1990;62:1008-1014.
15. Tomenius, L., *50-Hz Electromagnetic Environment and the Incidence of Childhood Tumours in Stockholm County*, Bioelectromagnetics 1986;7:191-207.
16. Savitz, D. A., H. Wachtel, E. A. Barnes, E. M. John and J. G. Tyrdik, *Case-Control Study of Childhood Cancer and Exposure to 60-Hz Magnetic Fields*, Am J Epidemiol 1988;128:21-38.
17. London, S. J., D. C. Thomas, J. D. Bowman, E. Sobel, T. C. Cheng and J. M. Peters, *Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields and Risk of Childhood Leukemia*, Am J Epidemiol 1991;134:923-937.
18. Ahlbom, A., *A Review of the Epidemiologic Literature on Magnetic Fields and Cancer*, Scand J Work Environ Health 1988;14:337-347.
19. Feychting, M. and A. Ahlbom, *Magnetic Fields and Cancer in Children Residing near*

- High-voltage Power Lines*, Am J Epidemiol 1993;138:467-481.
20. Coleman, M. and V. Beral, *A Review of Epidemiological Studies of the Health Effects of Living near or Working with Electricity Generation and Transmission Equipment*, Int J Epidemiol 1988;17:1-13.
  21. Preston-Martin, S., J. M. Peters, M. C. Yu, D. H. Garabrant and J. D. Bowman, *Myelogenous Leukemia and Electric Blanket Use*, Bioelectromagnetics 1988;9:207-213.
  22. Savitz, D. A., E. M. John and R. C. Kleckner, *Magnetic Fields Exposure from Electric Appliances and Childhood Cancer*, Am J Epidemiol 1990;131:763-773.
  23. Anderson, L. E., *Biological Effects of Extremely Low-frequency Electromagnetic Fields: In Vivo Studies*, Am Ind Hyg Assoc J 1993;54:186-189.
  24. Wilson, B. W., L. E. Anderson, D. I. Hilton and R. D. Phillips, *Chronic Exposure to 60-Hz Electric Fields: Effects on Pineal Function in the Rat*, Bioelectromagnetics 1981;2:371-380.
  25. Delgado, J. R. M., J. Leal, J. L. Monteagudo and M. G. Gracia, *Embryological Changes Induced by Weak, Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*, J Anat 1982;134:533-551.
  26. Conti, P., G. E. Gigante, M. G. Cifone, E. Alasse, G. Ianni, M. Reale and P. U. Angeletti, *Reduced Mitogenic Stimulation of Human Lymphocytes by Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*, FEBS Lett. 1983;162:156-160.
  27. Lyle, D. B., P. Schechter, W. R. Adey and R. L. Lundak, *Suppression of T-lymphocyte Cytotoxicity Following Exposure to Sinusoidally Amplitude-modulated Fields*, Bioelectromagnetics 1983;4:281-292.
  28. Morris, J. E. and R. D. Phillips, *Effects of 60-Hz Electric Fields on Specific Humoral and Cellular Components of the Immune System*, Bioelectromagnetics. 1982;3:341-348.
  29. Leung, F. C., D. N. Rommereim, R. G. Stevens, B. W. Wilson, R. L. Buschbom and L. E. Anderson, *Effects of Electric Fields on Rat Mammary Tumor Development Induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene*, In 10<sup>th</sup> Annual Meeting Abstracts Gaithersburg MB: Bioelectromagnetics Society, 1988. p. 2.
  30. Kirschvink, J. L., A. Kobayashi-Kirschvink, B. J. Woodford, *Magnetite Biomineralization in the Human Brain*, Proc Natl Acad Sci 1992;89:7683-7686.
  31. Fajardo-Gutiérrez, A., J. Garduño-Espinosa, L. Yamamoto-Kimura y colaboradores, *Residencia Cercana a Fuentes Eléctricas de Alta Tensión y su Asociación con Leucemia en Niños*, Bol Med Hosp Infant Méx 1993;50:32-38.
  32. Velásquez-Pérez, L., *Exposición a Campos Electromagnéticos y su Asociación con Leucemia en Niños*, Tesis de Maestría en Ciencias con Énfasis en Epidemiología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.
  33. Nair, I., M. G. Morgan and H. K. Florig, *Biological Effects of Power Frequency Electric and Magnetic Fields*, Washington DC: US Government Printing Office, 1989. OTA BP-E-53.



## **LA ENERGIA ELECTRICA EN MEXICO Y EL DESARROLLO SUSTENTABLE**

Leticia Campos Aragón  
Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM

### **La relación naturaleza-sociedad**

En su lucha por la sobrevivencia, el ser humano ha mejorado las condiciones de desarrollo de su civilización. Desde la revolución agraria (período neolítico) que marca el tránsito de la caza y la recolección de los dones de la naturaleza a la agricultura y la ganadería hasta adelantos científico-técnicos como el descubrimiento del electrón, de la composición del átomo, del funcionamiento de la célula viva y de la interrelación entre la masa y la energía, los seres humanos no han cesado por mejorar sus condiciones de vida y trabajo.

El desarrollo de la microelectrónica, la informática y la biotecnología así como la mecanización y automatización integral de la producción y el empleo de nuevos materiales y tecnologías desconocidos en el pasado responden a esa necesidad. Hoy el ser humano lanza satélites artificiales de la tierra, puede realizar viajes de investigación a la luna y se prepara activamente para la potenciación práctica del espacio ultraterrestre y para los viajes galácticos. Actualmente también es posible dominar en perspectiva la energía termonuclear y otros manantiales de energía.

No obstante, en pleno umbral del siglo XXI, la humanidad se encuentra con esta paradoja: precisamente cuando ha demostrado que sus posibilidades creadoras e intelectuales son inagotables, se enfrenta con un complejo de problemas que no son exclusivos de una región o país sino del mundo en general, problemas como la perturbación del medio ambiente, el hambre, la pobreza, el narcotráfico, la drogadicción, la guerra y la dependencia financiera.

¿Cómo explicar hoy el hecho de que la humanidad al "conquistar" la naturaleza ha socavado al mismo tiempo y en gran medida las bases naturales de su propia vida? ¿Cómo explicar este desequilibrio entre el hombre y la naturaleza, que constituye la esencia del problema ecológico?



En primer lugar, tomando en consideración que la ley general del desarrollo social de la naturaleza humana, nos dice que la vida en toda sociedad implica un modo de producción. Dependiendo de esta organización social serán las tradiciones, costumbres, formas de vida o sea, la cultura con la que los seres humanos realizan el trabajo que les permite lograr su intercambio de materias con la naturaleza. Precisamente por ese metabolismo, en el que la producción material juega un papel fundamental, es que se logra la unidad del hombre con la naturaleza, la transformación de ésta y su adaptación a las necesidades de aquél, es decir, la creación de la "segunda naturaleza".

En segundo lugar, considerando, como lo hace Enrique Leff, que en el capitalismo, es el proceso de producción material, de expansión y de acumulación del capital, lo que condiciona el funcionamiento, la evolución y la estructuración de los ecosistemas, así como las formas técnicas de apropiación de la naturaleza. De manera tal que los procesos ecológicos y la transformación de la naturaleza se han inscrito desde entonces en la dinámica del capital. Aquí es muy importante considerar los cambios registrados desde la segunda mitad del siglo XX cuando se inicia la primera Revolución científico técnica.

En tercer lugar, tomando en cuenta que el desequilibrio en la relación naturaleza-sociedad es un proceso histórico. Eric Wolf<sup>1</sup>, nos advierte que el mundo de la humanidad constituye un total de procesos múltiples interconectados no sólo en el presente sino también en el pasado y que los esfuerzos por descomponer en sus partes a esta totalidad que luego no pueden rearmarla, falsean la realidad.

Sin embargo, lograr la observación de esos vínculos e interconexiones no sólo en el presente sino también en el pasado no es tarea fácil aunque fundamental para explicar las consecuencias de las acciones indiscriminadas del hombre hacia la naturaleza ocurridas hace muchos decenios y que aún se dejan sentir. Nicolo Gligo<sup>2</sup> establece, por ejemplo, cuatro aspectos básicos para el manejo ambiental de la América Latina en el período colonial sucedidos a raíz de la conquista española:

1. Se desarticulaban las antiguas culturas que en alguna medida habían tenido éxito en la integración sociedad entorno físico sobre

<sup>1</sup> Wolf, Eric, *Europa y la Gente sin Historia*, Fondo de Cultura Económica, 1994.

<sup>2</sup> Gligo, Nicolo, *Medio Ambiente y Recursos Naturales*, en Sunkel, Osvaldo, *El Desarrollo desde Dentro*, Fondo de Cultura Económica, México. 1991.

- todo en los grandes imperios. Los imperios se desorganizaron social, demográfica y estructuralmente, además de ser saqueados;
2. La producción agrícola, en un principio se orientó para servir a la minería. Sin embargo al incorporarse nuevos rubros agrícolas y ganaderos, la mentalidad de extracción minera siguió predominando en el trato de los recursos agrícolas de la región;
  3. En la medida en que se descubrían nuevos territorios se generalizaba la creencia de que los recursos naturales de la América eran prácticamente infinitos. Esta idea se mantuvo durante siglos y con el devenir del tiempo tuvo un efecto sumamente negativo en las tasas de extracción y en la preocupación por la conservación; y,
  4. La organización del territorio se dio en función de los objetivos de la Corona y posteriormente a la Independencia iberoamericana, la apropiación de los recursos productivos por propietarios nacionales en general, no influyó mayormente, para que el tratamiento de los recursos aún fuese minero.

Muchos ejemplos como este tenemos no sólo en América Latina, sino en todo el mundo. Cada vez un número más pequeño de países del norte del planeta, valiéndose de los medios técnicos cada vez más potentes, se han apropiado de los recursos naturales del sur del planeta consumiéndolos de manera intensa. Así lo demuestra la historia antigua, el medievo, la revolución industrial y desde la segunda mitad del siglo veinte, el nacimiento y desarrollo de la revolución científico-técnica. Son los principales logros de esta revolución los que han servido como instrumento fundamental a esos países del norte para asegurar la altísima concentración, centralización e intensidad del capital que tampoco tiene precedente en la historia de la humanidad y que, en este contexto, dan lugar a los grandes problemas globales que hoy enfrenta la humanidad<sup>3</sup>.

¿Por qué la ciencia social no ha logrado explicar el desequilibrio entre la naturaleza y la sociedad y menos aún desarrollar una alternativa real frente al problema ecológico?. Una respuesta inicial es el hecho de que la gran mayoría de los pensadores sociales han intentado explicar el funcionamiento de las formaciones sociales y su apropiación y transformación de la naturaleza por ellas a través de la fragmentación de la ciencia social en

<sup>3</sup> Campos Aragón Leticia, *Crisis Global y Reestructuración Económica Mundial*, en Calva Tellez, José Luis, coordinador general, *Globalización y Bloques Económicos: Realidades y Mitos*, Juan Pablos (Ed.), México. 1995.

distintas disciplinas. Ya Immanuel Wallerstein<sup>4</sup> expuso en su teoría sobre el mundo social su protesta política por dichas divisiones que se derivan de la ideología liberal dominante en el siglo XIX, la cual sostenía que estado y mercado, política y economía eran dominios analíticamente delimitados y en gran medida autónomos, con sus reglas particulares.

También esos "científicos" consideran que todo lo que ocurre a la materia es objeto de estudio exclusivo de las ciencias naturales y lo que es peor, a raíz del derrumbe del llamado socialismo, la teoría neoliberal ha ido ganando terreno al establecer que el objeto de estudio de las "disciplinas" de las ciencias sociales son los bienes escasos y los individuos aislados negando con ello no sólo la existencia de las clases sociales, sino la ley general de la naturaleza humana que nos dice que la vida en toda sociedad, implica un modo de producción.

Lo cierto es que, como lo señala Martínez Alier<sup>5</sup>, la larga historia de interrelaciones entre las ciencias naturales y la "economía" aún está por escribirse. Por lo pronto coincido con este autor en que el hecho de que una sola especie, es decir la especie humana, se apropie ella sola de casi toda la energía producida por la fotosíntesis, debería ser motivo de alarma.

### **La crisis ecológica y la energía eléctrica**

A las acciones indiscriminadas del ser humano hacia la naturaleza donde destacan la tala inmoderada, el sobrecultivo, la irrigación deficiente y el sobrepastoreo, se suman durante el siglo XX la introducción masiva a la atmósfera de gases, humos, polvos, coloides, microbios y otras sustancias producto de la revolución industrial que perturbaron el balance gaseoso de la composición atmosférica. Este impacto ambiental se acrecentó a partir de los años cincuentas cuando la revolución científico-técnica introdujo a su vez miles de productos químicos a la biósfera y otros productos secundarios además de radiaciones. La urbanización acelerada, que se da en estos mismos años, al arrojar sustancias contaminantes en el ambiente producto de condiciones de trabajo insalubres, escasez de vivienda, aglomeramiento de los medios masivos de transporte; proliferación del automóvil; incremento de la pobreza; exclusión social y segregación espacial, también ha contribuido con su carga perturbadora en el medio ambiente.

<sup>4</sup> Wallerstein, Immanuel y otros, *La Teoría Social Hoy*, Conaculta, Alianza Editorial, México, 1987.

<sup>5</sup> Alier Martínez, Joan y Schlupmann, *La Ecología y la Economía*, Fondo de Cultura Económica, México, 1991.

En todo lo anterior juegan un papel central los energéticos, carburante del motor de la civilización actual. De ellos depende la solución de las necesidades de calefacción, vestido, alimento, viajes y en general bienestar de los seres humanos. Para la producción de dichos energéticos se utiliza en lo fundamental el combustible fósil no renovable. Actualmente el 88 por ciento de la energía comercial usada en el mundo procede de este tipo de combustibles que cuando se queman desprenden calor en forma de dióxido de carbón, vapor de agua, dióxido de azufre y otros productos de la combustión que van hacia la atmósfera como residuos. La generación de energía eléctrica es una de las fuentes importantes de este tipo de contaminación. Los efectos contaminantes de mayor importancia causado por las centrales termoeléctricas son los siguientes<sup>6</sup>:

- *Impactos locales*: partículas sólidas;
- *Impactos regionales*: gases causantes de las lluvias ácidas (anhídrido sulfuroso  $\text{SO}_2$  y óxido de nitrógeno  $\text{NO}_x$ ); e,
- *Impactos globales*: gases de efecto invernadero (dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , y óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$ ).

A juicio de Michel Grenon<sup>7</sup>, por cada kWh eléctrico producido se desprenden dos o más de dos kWh térmicos en la atmósfera, ríos o en los océanos generando microclimas artificiales alrededor de la zona de desprendimiento térmico del parque de energía creando burbujas de calor o islotes calientes. Estas islas de calor urbano se comportan como burbujas turbulentas que desvían las corrientes atmosféricas normales hacia arriba, reducen los vientos locales y tienden a formar células de convección que aíslan la masa de aire urbano de las otras masas de aire que lo rodean.

Lo cierto es que desde fines de los años sesentas del siglo XX, el panorama ambiental no era ya nada halagador. La destrucción porcentual de la ozonósfera, la contaminación del océano mundial; la erosión derivada de un mal uso del suelo y la desertificación que de ella se deriva; la tala indiscriminada de las selvas tropicales del planeta y la devastación de los bosques templados por la lluvia ácida, empezaron a mostrar la contradicción

<sup>6</sup> Alonso Rodríguez, Angel M., *Nuevas Tecnologías de Generación Eléctrica y Medio Ambiente*, en Bauer Ephrussi, Mariano, Quintanilla Martínez, Juan y Saiz de Bustamente, Amalio, *Internalización de Costos Ambientales*, Programa Universitario de Energía, UNAM, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad Complutense de Madrid, México, 1995.

<sup>7</sup> Grenon, Michel, *La Crisis Mundial de la Energía*, Alianza Editorial, Madrid, 1974.

existente entre el volumen total de la acción de la sociedad sobre la naturaleza y el restablecimiento del equilibrio de la misma (homeóstasis).

Esta situación llevó a la formación en 1972 de una Organización No Gubernamental (ONG) que agrupa en sus filas a científicos, políticos y hombres públicos de distintos países, cuya actividad está orientada a investigar los problemas globales de la actualidad a fin de lograr la comprensión de las dificultades que surgen en el proceso de desarrollo de la humanidad e influir en ese sentido en la opinión pública. El Club de ROMA como fue llamada esta ONG tiene el enorme mérito de ligar entre sí parámetros que en general solían tratarse de modo independiente (población, recursos naturales, las inversiones industriales, contaminación, situación financiera, etcétera)<sup>8</sup>. Sin embargo, la metodología de enfoque global de Jay Forrester profesor de Dinámica de Sistemas del M.I.T en la que se basa el Club de Roma para tratar de analizar globalmente los problemas de la humanidad, tiene la limitación de no incluir las diferencias entre países industriales y países en vías de desarrollo, ni tampoco las motivaciones, las aspiraciones o los valores humanos y engloba bajo la rúbrica única "recursos naturales" todos los recursos desde los minerales raros hasta el uranio, el petróleo, etcétera<sup>9</sup>.

En el informe *Nuestro Futuro Común* presentado en 1987 por la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas, comisión presidida por la primera ministra de Noruega Gro Harlem Brundtland, se señala que últimamente en el desarrollo de la humanidad se advierten varios resultados positivos e indicios prometedores: disminuye la mortalidad infantil, aumenta la esperanza de vida, en todos los países crecen la parte de los mayores que saben leer y escribir y la parte de los menores que frecuentan la escuela, los ritmos del incremento de los recursos alimenticios en el mundo son superiores a los del crecimiento demográfico. Sin embargo, se dice en el informe, los procesos que permitieron alcanzar estos resultados positivos condujeron asimismo al surgimiento de unas tendencias cuya influencia no podrán soportar mucho tiempo ni el planeta, ni su población.

En el medio ambiente se advierten fenómenos peligrosos, capaces de cambiar radicalmente el aspecto del planeta y que amenazan a la existencia de muchas especies biológicas, incluyendo el género humano. La

<sup>8</sup> Meadows, Dennis, et al., *The Limits to Growth*, New York, Universe Books, 1972.

<sup>9</sup> Véase también, Oltmans, Willen, *Debate sobre el Crecimiento*, Fondo de Cultura Económica, México, 1975.

humanidad se dirige hacia el desastre: muerte por inanición o muerte por contaminación.

### **La energía eléctrica y el desarrollo sustentable**

A pesar de que las conclusiones del informe Brundtland coinciden con las esbozadas años antes por el Club de Roma, el principal logro de aquél consiste en el llamado de atención respecto a lo que hoy se conoce como desarrollo sostenible o sustentable, es decir, "que cada sociedad, cada país, cada región y el mundo entero puedan disfrutar de la mayor calidad de vida sin poner en peligro la biósfera ni la supervivencia de futuras generaciones".

En 1991 en un segundo informe sobre los límites del crecimiento intitolado Más allá de los límites del crecimiento, el Profesor Dennis Meadows y varios de sus antiguos colaboradores y nuevamente a solicitud del Club de Roma, nos dicen que los insumos totales de la economía humana han crecido entre 1860 y 1985 por un factor de 60. El consumo de la energía mundial ha seguido creciendo, en forma desigual pero inexorable, a través de las guerras, recesiones, inestabilidad de precios y cambios tecnológicos. Sostienen que la mayor parte de la energía fluye a través del mundo industrializado. El promedio europeo utiliza entre 10 y 30 veces más energía comercial que la población promedio de un país en desarrollo, y el promedio estadounidense usa 40 veces más. Respecto a la Conferencia sobre la Energía Mundial realizada en 1989 Meadows nos dice que en ésta se previó que un crecimiento a las tasas habituales de la población y el capital incrementaría la demanda mundial de energía en otro 75 por ciento para finales del año 2020, y que el conjunto de combustibles que proveen dicha energía seguirían dominados por los combustibles fósiles no renovables: carbón, petróleo y gas<sup>10</sup>.

En 1992 en la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas que tuvo lugar en Río de Janeiro, Brasil, los países participantes establecieron el principio del Desarrollo Sustentable también, por cierto, incorporado en el Tratado de Maastricht.

Desde entonces se propuso, como estrategia comunitaria, empezar a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y gases de invernadero producidos por las actividades humanas en el campo de la energía.

<sup>10</sup> Meadows, Donella, et.al., *Más Allá de los Límites del Crecimiento*, Aguilar, ediciones. Buenos Aires-México, 1992.



En México, las fuentes de energía primaria que se utilizan para producir electricidad son las siguientes: combustóleo, gas natural, carbón, uranio, diesel, agua, vapor endógeno y aire. Tan sólo el combustóleo, el gas natural y el agua, constituyen el 82.5 por ciento de los energéticos primarios que se utilizan en México para producir electricidad. Por eso, es en la fase de la generación donde ocurren los mayores impactos ambientales en comparación con la transmisión, transformación y distribución de dicho energético estratégico.

No obstante, como uso de energía, o sea, en su utilización, la electricidad se caracteriza por su limpieza, seguridad y versatilidad, de ahí su alta demanda a nivel mundial. En México, la demanda de electricidad rebasa en su crecimiento al registrado por la población y la economía en las últimas tres décadas.

Según la principal empresa generadora de electricidad de nuestro país, Comisión Federal de Electricidad (CFE)<sup>11</sup>, el combustóleo que se produce en México en grandes volúmenes es residuo de la refinación de los crudos pesados que abundan en el mismo; por ello tiene altos contenidos de azufre y asfaltenos y bajo valor en el mercado internacional.

Esto y las características de las refinerías existentes conduce a la generación de electricidad en termoeléctricas convencionales que quemen combustóleo cuyo impacto ambiental clasificado por tipo es el siguiente:

- **Petróleo**

- Contaminación de suelo y agua y perturbación de ecosistemas por derrames durante la exploración, explotación y transporte de petróleo;
- Contaminación atmosférica por emisiones de  $\text{SO}_x$   $\text{NO}_x$  y partículas;
- Efectos climáticos globales por emisión de  $\text{CO}_x$ ;
- Contaminación de aguas costeras por descargas de aguas residuales;
- Contaminación térmica de cuerpos de agua (lagunas, ríos, mar, etcétera); y,
- Acidificación de suelos y aguas por lluvia ácida (sólo en ambientes geológicos con predominio de rocas ácidas).

<sup>11</sup> Comisión Federal de Electricidad, *Impacto Ambiental de Centrales Eléctricas de la CFE*, Centro de Adiestramiento de Operadores de Ixtapantongo, México.

- **Carbón**

- Degradación de ecosistemas y paisajes por minería del carbón;
- Riesgo de contaminación de agua subterráneas con metales pesados durante la extracción y almacenamiento del carbón y en disposición final de cenizas;
- Contaminación atmosférica por emisiones de  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y partículas;
- Efectos climáticos globales por emisión de  $\text{CO}_x$ ;
- Contaminación térmica de cuerpos de agua (lagunas, ríos, mar, etcétera); y,
- Acidificación de suelos y aguas por lluvia ácida (sólo en ambientes geológicos con predominio de rocas ácidas).

- **Gas**

- Contaminación atmosférica por emisiones de  $\text{NO}_x$ ;
- Efectos climáticos globales por emisión de  $\text{CO}_x$ ; y,
- Calentamiento del agua de enfriado (lagunas, ríos, mar, etcétera).

Al respecto es importante señalar lo siguiente, el  $\text{CO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y las partículas sólidas son los principales productos de la combustión. Los dos últimos son inherentes a este proceso de combustión pero se puede controlar y regular para que se emitan en bajas cantidades. No hay que olvidar que aunque el  $\text{SO}_x$  viene en el combustible, se puede quitar de éste o comprando combustible sin azufre y se puede quitar en los gases de combustión. Hay tratamientos químicos para quitar  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ . Otro aspecto importante es que éstos están ausentes del gas natural.

Los óxidos de carbon son dos:  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ . El primero se forma por mala combustión por lo que no debe existir, además es venenoso. Los motores de gasolina pueden producir monóxido. El único compuesto que es producto de la combustión y que no se elimina tan fácilmente es el bióxido de carbono. Se elimina con fotosíntesis  $\text{CO}_2$ , nitrógeno y oxígeno. Además, hay más bióxido de carbono por unidad de energía útil en el carbón que en el combustóleo.

¿Qué está haciendo al respecto la principal empresa generadora de electricidad en México, Comisión Federal de Electricidad, para el control de emisiones a la atmósfera?



1. Programas de puesta a punto de los generadores de vapor para optimizar la combustión y minimizar la emisión de compuestos nocivos ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ , CO y partículas);
2. Medición y monitoreo continuo de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ , CO y partículas (opacidad) para detectar y corregir de inmediato las emisiones por mala combustión y los efectos nocivos a la atmósfera;
3. Sustitución al 100 por ciento del combustóleo por gas natural en la zona metropolitana y el Valle de México, lográndose disminuir a un 96 por ciento la emisión de partículas,  $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_3$  en los gases de combustión;
4. Mejoramiento en el control de exceso de aire modificando los diseños de quemadores y de los estabilizadores de flama, calibración de fichas de atomización y con la limpieza de quemadores en forma periódica. También se han instalado ventiladores recirculadores de gases que mejoran el rendimiento de la combustión al evitar la formación de  $\text{NO}_2$  y se han instalado quemadores de baja producción de  $\text{NO}_2$  y que permiten realizar la combustión con menor cantidad de exceso de oxígeno;
5. Instalación de viscosímetro en línea para controlar la viscosidad del combustóleo por variación de su temperatura consiguiéndose de este modo una óptima atomización y por consecuencia una adecuada combustión con disminución de las emisiones contaminantes;
6. Implementación de redes perimetrales de monitoreo continuo para determinar la calidad del aire en la zona de influencia;
7. Uso de aditivos para el combustóleo a fin de disminuir la formación de  $\text{SO}_3$ , minimizar las emisiones (en particular ácidas), disminuir la formación de ácidos sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) resultando de la condensación de los gases y elevar el PH de las cenizas; e,
8. Incremento en la altura de las chimeneas (120-150 m) con la finalidad de lograr una mejor dispersión de los gases de combustión a la atmósfera, logrando que las concentraciones a nivel de piso se encuentren dentro de los límites establecidos por las normas.

CFE tiene muy claro que la mejor tecnología disponible para reducir las emisiones de óxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ ), partículas y bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en termoeléctricas de vapor que quemen carbón o combustóleo, consiste en someter los gases de combustión a tres procesos específicos suce-

sivos antes de lanzarlos por la chimenea. Estos procesos son los siguientes:

1. Reducción catalítica selectiva para transformar el  $\text{NO}_2$  a  $\text{N}_2$  más  $\text{H}_2\text{O}$  mediante la adición de amoníaco ( $\text{NH}_3$ );
2. Precipitación electrostática para remover las partículas volátiles; y,
3. Desulfuración que convierte el  $\text{SO}_2$  en yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) más bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) mediante reacción de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Estos tratamientos, sin embargo, tienen considerables costos de inversión y operación y agregan más del 30 por ciento al costo de inversión.

También, a juicio de CFE, están comenzando a entrar al mercado comercial tecnologías de quema del carbón que ofrecen grandes ventajas en materia ambiental sobre las actuales. Sin embargo son aun más caras. Se trata de las llamadas "tecnologías limpias que permiten reducir las emisiones de  $\text{SO}_3$  y  $\text{NO}_x$ .

*a) Combustión de lecho fluidizado a la presión atmosférica o mayor*

Consiste en mezclar carbón y cal granulados que se suspenden en una corriente de aire, de modo que su combustión prolongada permite que el bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) contenido en el carbón reaccione con el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) para producir bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) más yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) reduciendo así las emisiones de  $\text{SO}_2$  a la atmósfera. Según CFE, con esta tecnología se abate también la producción de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) pues la temperatura de combustión se mantiene baja ( $\sim 850^\circ\text{C}$ ).

*b) Gasificación integral*

En ella el carbón es convertido primero a gas, luego es limpiado de azufre (eliminando  $\text{H}_2\text{S}$ ) y finalmente quemado en un combustor de baja temperatura para evitar formación de  $\text{NO}_x$ .

*c) Ciclo combinado de las dos tecnologías anteriores*

Para CFE, en este arreglo, los gases de combustión a alta temperatura pueden generar electricidad mediante una turbina de gas y luego, a la

salida de estas y a temperatura menor, producen vapor que vuelve a generar electricidad mediante una turbina de vapor. De este modo la eficiencia térmica global del proceso es apreciablemente mayor (pasa de 8.3 en la turbina de vapor a 8.5 en ciclo combinado). Aparte de la ganancia económica para esta empresa queda claro que el ciclo combinado ofrece una ventaja ambiental muy importante pues la producción de CO<sub>2</sub>/kWh generada es menor.

No obstante que desde el punto de vista ambiental las tecnologías denominadas de gasificación integral seguida de la de lecho fluidizado son, a juicio de CFE, las de mejor desempeño, esta empresa establece que la mejor estrategia para reducir emisiones puede ser el cambio a gas natural.

En el mismo estudio se dice que, para el caso del combustóleo, están ya también en el mercado tecnologías mucho más limpias, similares a la de gasificación integrada del carbón, esto es, las de gasificación por oxidación parcial.

Estas tecnologías permiten transformar los combustóleo pesados (con contenidos altos de asfaltenos, metales y azufre) en gas sintético y subproductos (metales pesados y azufre). Como consecuencia, la combustión del gas resultante produce emisiones atmosféricas mucho más limpias.

La Tabla 1 muestra las emisiones de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas en una planta convencional que quemará combustóleo y las de una planta que quemará en ciclo combinado el gas sintético producto de la gasificación del mismo combustóleo.

**Tabla 1**

**Emisiones atmosféricas para dos tecnologías  
de quema de combustóleo**

Tecnología	Emisiones mg/m <sup>3</sup> n		
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Partículas
Turbina de vapor más desulfurador de gases, reductor catalítico selectivo y precipitador electrostático	250-400	418-695	30-68
Ciclo combinado con gasificación previa del combustóleo	12-25	78-120	1.5-4

Fuente: Comisión Federal de Electricidad.

Las llamadas tecnologías blandas son el otro tipo de tecnología para utilizarse con el objeto de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera porque se basan en la utilización de recursos energéticos no fósiles.

Estas tecnologías, las denominadas blandas, han sido clasificadas de la siguiente manera:

- **Energía nuclear (átomo)**

- Reactores LWR avanzados (seguridad pasiva);
- Reactores reproductores;
- Reactores de alta temperatura; y,
- Fusión nuclear.

- **Energías renovables**

- Energía eólica (viento);
- Energía solar;
- Hidroenergía; y,
- Energía geotermia.

Lo anterior no significa, desde luego, que la utilización de estas energías anule por completo el impacto ambiental por generación de electricidad. En las llamadas energías blandas también hay afectación ambiental aunque ésta no es por emisiones de CO<sub>2</sub> como ocurre con las centrales termoeléctricas.

Según Comisión Federal de Electricidad en el estudio antes citado nos dice que el impacto ambiental por generación eléctrica con base en recursos renovables es el siguiente:

- **Nuclear**

- Contaminación y degradación de terrenos por minería del uranio;
- Emisiones radioactivas de bajo nivel durante la operación;
- Riesgos de accidentes de muy baja probabilidad pero de muy alto impacto;
- Disposición de residuos radioactivos de muy larga vida media; y,
- Contaminación térmica de cuerpos de agua ( lagunas, ríos, mar, etcétera).

- **Geotermia**

- Cambio de ecosistemas durante la construcción;
- Permutación acústica del entorno durante la operación;
- Contaminación de suelos y agua por salmueras; y,
- Emisiones moderadas de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

- **Solar y eólica**

- Ocupación del terreno;
- Efectos ambientales anteriores a la construcción; y,
- Ruido en la eólica.

- **Hidroenergía**

- Inundación del terreno por embalse y desecación de terrenos por aguas abajo del embarse;
- Destrucción de ciertas extensiones de ecosistemas;
- Desplazamiento de población; y,
- Cambios en el régimen hidráulico y la carga de sedimento de los ríos.

- **Biomasa**

- Partículas

De todas estas instalaciones eléctricas la generación hidráulica y la geotermia tienen ventajas ambientales sobre la basada en combustión. La hidráulica es renovable; tiene impactos locales nulos sobre la calidad del agua y aire; tasa nula de emisión de gases con efecto invernadero y efectos laterales positivos en reducción de erosión y control de avenidas.

La generación geotérmica es generalmente renovable; tiene impactos ambientales controlables a costos moderados y tasa nula de emisión de gases con efecto invernadero.

Otro tipo de reducción del impacto ambiental por parte de Comisión Federal de Electricidad en sus centrales eléctricas consiste fundamentalmente en lo siguiente.

## **Control y tratamiento de aguas residuales**

1. Asegurar que las aguas residuales de las centrales cumplan con las normas establecidas por la ley general de protección ambiental y el equilibrio ecológico y se evite la contaminación de los cuerpos de agua;
2. Regularizar los registros de descarga de aguas residuales de las centrales termoeléctricas con la SEMARNAP y ante la C.N.A. a fin de establecer para cada central las condiciones particulares de descarga. Este control se atenderá en forma rigurosa y con la periodicidad establecida;
3. Separar los drenajes de la central para que no se mezclen las descargas de las aguas que contienen residuos de combustibles y aceite con la de aguas pluviales y que mediante fosas de separación (tipo A.P.I.) se asilen los aceites y otros compuestos;
4. Los efluentes son eliminados o tratados, según el caso y el lugar, mediante lagunas de evaporación, pozos de absorción, fosas de neutralización, plantas de tratamiento tipo paquete para aguas negras y fosas sépticas;
5. Tratamiento de las aguas negras para su utilización en sistemas de enfriamiento mediante el proceso de lodos activados, a fin de disminuir el consumo de agua de pozo y devolverla en mejores condiciones de concentración de desechos al canal de donde se extrajo y así posibilitar su uso para fines de riego;
6. Incrementar el reuso del agua de enfriamiento mediante sistemas de tratamiento lateral a fin de disminuir la extracción de agua del subsuelo y reducir la descarga de aguas residuales; y,
7. En las centrales costeras se han implantado un monitoreo constante del impacto químico y térmico de las descargas de los efluentes a fin que no se alteren las condiciones ecológicas del lugar donde descargan.

## **Manejo y disposición de residuos sólidos**

1. En centrales carboeléctricas se han implementado precipitadores electrostáticos de alto rendimiento (99.7%) para la recolección de cenizas, por lo que la emisión de partículas a la atmósfera es prácticamente despreciable, además, se han instalado aditivos

- supresores de polvo que se aplican en las pilas de carbón durante su manejo. Se emplean cubiertas en las bandas transportadoras que evitan la dispersión de polvos y se utilizan generadores ciclónicos con los que se colectan polvos que se producen al manejar el carbón;
2. La disposición final de cenizas en las centrales se efectúa en depósitos controlados con lecho impermeable y cubierta vegetal, además de una red perimetral de pozos de monitoreo para vigilancia y control de la infiltración de lixiviados; y,
  3. El manejo de residuos sólidos de áreas de trabajo y de servicios se realiza en recipientes sanitarios y su disposición final se hace mediante rellenos sanitarios por la contratación del servicio.

### **Control de la contaminación por ruido**

1. Control de vibraciones, en muchos casos el ruido se origina en un equipo o superficie que está vibrando;
2. Instalación de silenciadores a la succión o descarga de fluidos en diversos equipos como ventiladores, sopladores, motores, válvulas de seguridad, etcétera;
3. Aislamiento de la fuente emisora mediante algún material sumamente masivo (piedra, concreto, plomo, etcétera) con objeto de que la transmisión de la onda sonora hacia el exterior sea mínima, o bien el amortiguamiento de la onda sonora mediante una cámara que absorba el ruido (materiales tales como poliestireno, fibra de vidrio, corcho, etcétera); y,
4. Protecciones individuales cuando cualquiera de las soluciones anteriores es técnicamente imposible o sumamente onerosa, en su caso, los trabajadores deben usar tapones auditivos, auriculares y cascos adecuados al nivel del ruido existente y del abatimiento producido por el tipo de protectores.

Estos esfuerzos de reducción de impacto ambiental en las centrales eléctricas de la principal empresa generadora de este fluido en el país se debe a que por la abundancia de los crudos pesados en México; por el hecho real de que desde 1981 México se volcó a la monoproducción y exportación del mismo y por los altos costos de inversión y en algunos casos de operación de las energías no convencionales para generar electricidad,

la generación dominante de este energético en el país seguirá siendo por largo tiempo, a través de plantas termoeléctricas convencionales que quemen combustóleo, gas natural y carbón, a pesar de que este combustóleo tiene altos contenidos de azufre y asfaltenos que dañan seriamente la vegetación y agravan las vías respiratorias del hombre y de lo irracional que significa la quema del petróleo cuando la industria química lo demanda como materia prima. Esta decisión se ha basado en tres criterios fundamentales:

1. *Fuentes de energía disponibles:* estas en nuestro país lo son los combustibles fósiles (combustóleo, carbón y gas natural), el átomo, el vapor, los vientos, el sol y el agua;
2. *Bajo costo:* en México, una tecnología barata la constituyen las centrales termoeléctricas de vapor convencional a base de combustibles fósiles (combustóleo, carbón y gas natural) cuya eficiencia es del 30 al 40 por ciento y su costo es de cinco a 10 centésimas de dólar por kWh; y,
3. *Limpieza y seguridad:* los avances tecnológicos descritos arriba nos permiten afirmar que una tecnología que reúne estas características la constituyen las termoeléctricas a base de combustibles fósiles (el gas natural y carbón) pues como ya explicamos su impacto ambiental se puede minimizar. Lo mismo sucede con las centrales eólicas, solares e hidroeléctricas y otras como la nuclear.

A manera de conclusión quisiera señalar lo siguiente. Es evidente que el problema de reducir el impacto ambiental por generación de electricidad no depende de la tecnología empleada pues existen alternativas tecnológicas para su solución, sino en otros aún más complejos que tienen que ver con la generación de la riqueza, su distribución (PNB per cápita) y el crecimiento de la población. Y esto, nos guste o no, tiene que ver a su vez con la cultura y la organización social.

## Bibliografía

- Barkin, David, *Un Desarrollo Distorsionado: La Integración de México a la Economía Mundial*, Siglo Veintiuno Editores, México, 1991.
- Barkin, David, *Riqueza, Pobreza y Desarrollo Sostenible*, Grupo Interamericano, México, 1995.



- Barkin, David, *Alimentos versus Forrajes, La Situación entre Granos a Escala Mundial*, Siglo Veintiuno Editores, México, 1991.
- Giddens, Anthony, *La Teoría Social, Hoy*, Alianza Editorial, México, 1987.
- Martínez, Joan, *De la Economía Ecológica al Ecologismo Popular*, Editorial Nordan-Comunidad, 1995.
- Sunkel, O. y Gliogo, N, *Estilos de Desarrollo y Medio Ambiente en la América Latina*, Fondo de Cultura Económica, México, 1980.
- Marx, Carlos y Engels, Federico, *Marx a Engels*, 25 de marzo de 1868, Obras.
- Bolaños, Federico, *El Impacto Biológico, Problema Ambiental Contemporáneo*, Coordinación General de Estudios de Posgrado, Instituto de Biología, México, 1990. 476 p.
- Leff, Enrique, *Ecología y Capital*, Siglo Veintiuno Editores, México, 1986.
- Schmidhein, Stephan, *Cambiando el Rumbo*, Fondo de Cultura Económica, México, 1992.

# **POTENCIAL DE GENERACION ELECTRICA EN GRAN ESCALA CON ENERGIA EOLICA EN MEXICO**

Enrique Caldera Muñoz  
Consultor

## **Introducción**

### **• Estado actual de la tecnología de conversión eoloelectrónica en gran escala**

La tecnología de Centrales Eoloelectrificadas, para la conversión de energía eólica a electricidad, generada masivamente e interconectada a los sistemas eléctricos nacionales, es en la actualidad una tecnología madura, que tendrá un desarrollo explosivo a nivel mundial en los próximos años. A finales de 1995 en el mundo había una capacidad instalada en operación de 5 000 MW y lo que se sabía planificado para el año 2000 eran completar en operación 13 800 MW, según encuesta realizada por Riso National Laboratory de Dinamarca en 1995.

La conversión de energía eólica para la generación eléctrica en gran escala es una tecnología que se expande rápidamente a nivel mundial. Si al inicio de la década de los 80's los primeros parques eólicos estaban constituidos por aerogeneradores de 50 kW, ahora, a finales de 1996, las máquinas de 500 kW son el estándar comercial y se empiezan a instalar unidades en el rango de 600 a 750 kW.

Durante 1995 se instalaron 1 250 MW y en lo que falta del decenio, lo que se sabe planeado implica una tasa media de crecimiento de 2 000 MW por año, la mitad de los cuales se instalarán en Europa, donde se ha dado la mayor batalla por suprimir barreras estructurales e institucionales para la asimilación de generación eléctrica con fuentes renovables de energía.

### **Modalidades sociales en el aprovechamiento de la energía eólica para generación eléctrica**

Una tendencia generalizada, como fenómeno de la globalización, es

la disolución de las estructuras piramidales, jerarquizadas, hacia estructuras de red. Esta nueva estructura en redes ha tenido en la informática, con la computadora personal, el acceso a una línea telefónica y ahora con Internet, su difusión más significativa. En la producción industrial, existe la tendencia hacia la producción especializada en detrimento de la producción en masa. Es el sistema energético el que tiene la mayor inercia para un cambio estructural; sin embargo, es el sistema que encontrará la mayor presión política por razones financieras, ambientales y de sustentabilidad en el largo plazo, para el cambio hacia una estructura en red, en que la participación y responsabilidad de la sociedad en general será mayor. Esto llevará al desarrollo del esquema conceptual de la generación distribuida que complementará a la centralizada. Bajo este enfoque, miles de micro y pequeñas instalaciones generatrices y de cogeneración, así como sistemas de administración de demanda, se conjugarán a nivel de circuitos de distribución primaria y secundaria, para suavizar las curvas de demanda y eficientar el desempeño de los grandes sistemas interconectados.

Los municipios y las autoridades locales en desarrollo social y promoción productiva, tendrán que asumir también los desarrollos energéticos locales como parte del paquete de acciones a promover y coordinar. La apertura a las fuentes renovables de energía, significará la descentralización del Sistema Eléctrico Nacional, en dos aspectos, la planificación y gestión que se ligará más a los gobiernos estatales y municipales, y por la parte operativa, a una mayor responsabilidad y complejidad a nivel de distribución.

### **Requerimiento de una legislación y marco regulatorio adecuado**

Con el patrocinio del Banco Mundial y el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América, en 1988 se realizó un estudio internacional de mercado, cuyo informe final "The potential for wind energy in Developing Countries", evaluaba las posibilidades del desarrollo inmediato de este energético, para justificar la canalización de recursos, préstamos y asistencia a los países con las mejores perspectivas. México se mostró con un perfil de oportunidad muy bajo al desarrollo de la energía eólica, pese al vasto recurso eólico y un mercado eléctrico con alto crecimiento. Las razones de este resultado fueron el carácter monopólico de CFE, ser productores de petróleo y no significar una sangría de divisas su importación; tener tarifas eléctricas subsidiadas y problemas financieros en la industria eléc-

trica, así como la carencia de programas gubernamentales para el desarrollo de fuentes renovables de energía y por tanto, falta de mecanismos establecidos para el financiamiento a este tipo de proyectos.

Este tipo de análisis muestran claramente que la transición energética de una cultura de combustibles fósiles a una cultura energética sustentable, esto es, ampliamente soportada por energéticos renovables, significa que pasamos de un juego a otro, donde para hacerlo necesitamos cambiar primero las reglas del juego. Son los marcos institucionales, programáticos, legales, financieros y operacionales, los que determinan las reglas vigentes. La introducción de los recursos energéticos renovables implica modificar primero esos marcos.

De la misma manera que la Constitución establece la propiedad original de la Nación sobre los hidrocarburos, minerales radioactivos y recursos hídricos, es necesario se extienda a la energía solar y eólica, para que su explotación esté regulada de acuerdo a legislación y reglamentos, en concordancia con la normatividad de uso del suelo y régimen de propiedad del mismo. Una central eolieléctrica, normalmente no cambia el uso anterior del suelo, que generalmente es pastoreo en terrenos complejos o agricultura en los planos. Dada la relativa separación entre máquinas estas actividades se mantienen, por lo que el arrendamiento de la pequeña fracción de suelo que ocupan las máquinas y vías de acceso, requiere también de regulación. Los sitios con potencial eólico deben ser establecidos como reservas nacionales y restringir su uso del suelo a una actividad que no comprometa su posterior aprovechamiento energético.

Asimismo, la política fiscal deberá constituirse en un instrumento de incentivación y desincentivación a diferentes prácticas de aplicaciones y consumos de los energéticos. Los plazos de amortización y las tasas de interés para el financiamiento a obras de utilidad pública y carácter estratégico como agua potable y energía eléctrica, deberán adecuarse con un carácter preferencial, para efectivamente estimular esas inversiones.

La planificación del Sector Eléctrico se tendrá que realizar bajo un esquema descentralizado a nivel Estatal, involucrando entidades estatales de desarrollo económico y social, integrando las necesidades y oportunidades regionales al desarrollo eléctrico. Esto implica que instancias estatales sean las responsables de inventariar, evaluar y caracterizar sus recursos naturales, entre ellos sus energéticos renovables, para su adecuada explotación.

Se requiere de un marco institucional de carácter federal, que brinde

asistencia técnica y normatividad, para las actividades señaladas, como por cuanto a los demás aspectos regulatorios y normativos que sean necesarios. Esto implica a su vez una evolución en las funciones de las Divisiones de Distribución de CFE, orientándolas a una operación más compleja que incluya generación distribuida y administración de la demanda.

Por último, un aspecto fundamental es la definición por parte del Estado mexicano del rol que la energía eólica en particular, y las fuentes renovables en general, deberán jugar en la oferta general de energía, mientras no se definan estos escenarios deseables y posibles, en un marco general de planeación a largo plazo, se carecerá de los términos de referencia para diseñar todos los demás instrumentos de política energética requeridos para alcanzar las metas.

### **Potencial de desarrollo posible de generación eoloeléctrica**

Para el año 2000 el Sistema Nacional Interconectado podría asimilar 4 000 MW eólicos, ubicando 1 000 MW en la región centro norte (Durango, Zacatecas, Coahuila), 2 000 MW en la región centro oriente (Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato) y 1 000 MW en la región sureste (Oaxaca, Chiapas, Quintana Roo) con una aportación anual de 11.55 TWh. Obviamente esta meta es inalcanzable a esa fecha, ya que un camino que se debió empezar a principios de la década, aun no se inicia. El sistema nacional puede asimilar 500 MW por año y México podría extender su capacidad eoloeléctrica al orden de 5 000 MW para el 2010, si se toman ahora las decisiones pertinentes y existe la voluntad política de buscar un desarrollo realmente sustentable del Sector Eléctrico.

### **Modalidad de participación de la energía eólica en la generación eléctrica en gran escala**

#### **El recurso energético eólico y su metodología de evaluación y caracterización**

El recurso energético eólico de un país, puede ser evaluado con una metodología semejante a la aplicada a los recursos hidroeléctricos. En ambos casos se evalúan cuencas, en un caso áreas de escurrimiento y desniveles en su cauce, en el otro, las áreas con vientos energéticos y sus velocidades y rumbos. Ambas requieren de prospección, indirecta y directa, y

sus evaluaciones nos llevan por etapas de reconocimiento, estimación, prefactibilidad y factibilidad para determinar recursos en sus modalidades de reservas posibles, probables y probadas. Las que se estipularían como MW instalables, Factor de Planta esperado y energía eléctrica generada en GWh por año.

La evaluación del recurso energético eólico, como de cualquier otro energético renovable, debe expresarse en términos manejables por planificadores energéticos, de acuerdo a prácticas comúnmente aceptadas. Esto es importante estipular, dado el carácter difuso y distribuido de estos energéticos, ya que ello determinará una mayor participación de instancias regionales y/o Estatales en su aprovechamiento en función de necesidades de desarrollo regional.

### **La modelación matemática del viento como serie de tiempo**

En un lugar con viento energéticamente aprovechable, los datos promediados de su velocidad en intervalos de 15 minutos, corresponden a series de tiempo con las siguientes componentes:

- a) Patrón de estacionalidad a lo largo del año;
- b) Componente aleatoria de período largo (semanas);
- c) Componente aleatoria de baja frecuencia (oscilación con período de varios días);
- d) Patrón diario característico del mes o estación; y,
- e) Componente aleatoria con período de varias horas.

Este tipo de mediciones, promediando la velocidad del viento sobre períodos de 15 minutos, filtra la componente aleatoria de alta frecuencia, correspondiente a la turbulencia del flujo de viento, que ocasiona cambios significativos de velocidad en intervalos que van de segundos a varios minutos.

En un aerogenerador aislado, la inercia del rotor nos determina el tiempo de respuesta a los cambios instantáneos de velocidad del viento. El rotor actúa como un filtro pasabajos, en una analogía electromecánica. Para un grupo de aerogeneradores, con el espaciamiento mínimo requerido e interconectados a un mismo circuito, la componente de turbulencia que afecta a cada uno, es diferente en frecuencia, fase y amplitud, de tal forma que la generación agregada, no presenta fluctuaciones por la turbulencia,

compensándose entre ellos esta aleatoriedad, es así que la energía eléctrica producida por un conjunto de aerogeneradores, presenta únicamente las fluctuaciones de las componentes (a) a la (e).

Varios conjuntos de aerogeneradores en una misma zona, conectados al sistema eléctrico tienden a minimizar las desviaciones en el patrón diario al neutralizar mutuamente la componente aleatoria con período de algunas horas y un conjunto de centrales eoloeléctricas en una misma región geomórfica con diferencias topográfico climáticas, interconectadas al mismo sistema eléctrico, minimizarán también las oscilaciones con períodos de varios días, persistiendo fundamentalmente en la generación eléctrica agregada, la variación estacional a lo largo de los meses del año. Es esta característica de la generación agregada, lo que da certidumbre en el pronóstico de la generación eoloeléctrica a lo largo del año, sin afectar mayormente la programación de generación de las centrales convencionales.

### **Patrones característicos diarios y estacionales del viento**

Vista la magnitud de la velocidad del viento como una serie de tiempo con componentes aleatorias de baja, media y alta frecuencia, que son significativamente compensadas vía la diseminación geográfica de los puntos de explotación interconectados a un mismo sistema eléctrico, únicamente persisten a nivel regional los patrones diario y estacional del viento. Estos dos patrones están determinados por las características climático-topográficas de la misma y las condiciones climatológicas generales a lo largo del año, considerando también la altitud y la latitud de los puntos de explotación eoloenergética.

El patrón diario de vientos, considerando intensidad y rumbos, nos muestran la mecánica del viento en el sitio, permitiéndonos discriminar los factores topográfico-climáticos locales que inhiben o incrementan el viento en el sitio, permitiendo la localización óptima de los puntos de explotación así como determinar la "curva de oferta horaria" de generación eléctrica para un conjunto de aerogeneradores. Este patrón diario de generación eléctrica, establecido para cada mes, permitirá evaluar el grado de compatibilidad horaria entre la curva de demanda eléctrica en el circuito y el patrón de oferta eléctrica por los aerogeneradores.

Aunado a lo anterior, se debe considerar también la estacionalidad del viento, para tener un punto de comparación con la de demanda eléc-



trica. Estos dos patrones de viento, el horario y el estacional, constituyen elementos claves en la caracterización eoloenergética de un sitio de explotación, ya que de la compatibilidad con los patrones de demanda eléctrica horaria y estacional, dependerá el nivel de penetración de capacidad eoloeléctrica instalada en un sistema o en otras palabras, el porcentaje de generación eólica para cubrir la demanda regional del sistema eléctrico.

### **Compatibilidad de patrones de oferta energética y de demanda**

En las áreas del norte del país, la demanda eléctrica presenta pico estacional de verano, con máximas horarias entre las diez y las dieciocho horas. En las áreas del sur, el pico estacional es en invierno y las máximas horarias corresponden al período de las dieciocho a las veintidós horas. Estas diferencias se deben al clima extremoso del norte árido del país, donde a las cargas industriales se suman los requerimientos de aire acondicionado durante las horas de mayor insolación. En tanto que en el sur, sin los rigores climáticos del norte, el pico de demanda eléctrica tanto estacional como horaria, los determinan las necesidades de alumbrado eléctrico, a nivel residencial, comercial y municipal, siendo mayor la demanda invernal en razón de la disminución del número de horas con insolación.

En la región norte del país, es dominante la corriente de chorro del Suroeste durante el invierno, como viento en superficie, se ve afectado por efectos locales que lo incrementan en horas vespertinas. La parte central del país tiene en el verano mayor influencia de vientos del Este y Noreste, también con tendencia a que los efectos locales lo incrementen vespertina-mente, en tanto que en el sur del Istmo de Tehuantepec, los vientos máximos son otoñales con ligero incremento en fase con la insolación. El caribe mexicano presenta vientos máximos en marzo y mínimos en agosto y septiembre, con picos horarios en las primeras horas de tarde en el verano y el otoño, al medio día en invierno y de diecinueve a veintiuna horas en primavera, sin ser muy marcadas las diferencias horarias, ya que el sistema de vientos alisios que lo afecta actúan sobre las veinticuatro horas del día.

### **Aportación de energía y capacidad al sistema eléctrico**

Se considera que una central eoloeléctrica aporta energía eléctrica pero no capacidad eléctrica, es decir, capacidad disponible a voluntad del operador del sistema, dadas las componentes aleatorias que determinan la



velocidad media en períodos de minutos a lo largo del día, lo cual define el carácter estocástico de la generación eléctrica durante el día, ya que sobre el patrón diario de vientos se superponen las componentes de ruido de frecuencias medias (período de varias horas), sin embargo, varias centrales en una misma región, con algunos kilómetros de separación entre sí, amortiguan estas desviaciones horarias sobre el patrón diario típico, compensándose mutuamente.

De esta manera, un aerogenerador interconectado a la red aporta energía pero no capacidad, un conjunto interconectado, aporta energía sin fluctuaciones rápidas de potencia, pero sin aportar capacidad firme, un conjunto de centrales eólicas en una misma región geomórfica aporta energía con menores fluctuaciones horarias y empieza a contribuir con capacidad. Muchas centrales, comprendiendo diferentes regiones geográficas e interconectadas al mismo sistema eléctrico, aportan energía con variaciones estacionales y capacidad firme que tiende a igualar al factor de plante medio del conjunto de centrales, en la medida que la penetración se incrementa con la correspondiente dispersión geográfica de las centrales.

Para decirlo en pocas palabras, el remedio a la inestabilidad de la generación eoloeléctrica en un punto, es más generación eoloeléctrica en sitios diferentes, así sean desde cincuenta metros de separación entre máquinas, para anular las fluctuaciones por turbulencia; hasta varios kilómetros para compensar variaciones diarias y ajustarse al patrón diario típico del período.

La penetración por tanto, es un factor clave a determinar, en la explotación en gran escala de la energía eólica, aunado a una adecuada dispersión geográfica de los lugares de aprovechamiento. Una cifra de referencia para establecer escenarios de generación eoloeléctrica corresponde al 10 por ciento de la capacidad instalada total del sistema, un análisis detallado de la compatibilidad entre las curvas de demanda horarias y estacionales, respecto de los patrones de oferta eoloeléctrica horarios y también estacionales, determinarán el nivel técnico y económicamente deseable de penetración de la generación con viento.

Considerando los escenarios de consumo eléctrico para el año 2010 y los respectivos requerimientos de capacidad instalada, una penetración de 10 por ciento de capacidad eoloeléctrica significarían 5 000 MW instalados, los que con una apropiada distribución geográfica podrían aportar entre 0.25 a 0.35 de la capacidad instalada como capacidad firme durante el año, es decir, oscilando entre 1 250 y 1 750 MW.

## Costos de la generación eoloelectrónica

### Consideraciones metodológicas

En 1986 se realizó en el IIE el estudio de costos de inversión y generación eléctrica con energía eólica, de acuerdo a la metodología usada por CFE para estimarlos, según el manual *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*, Tomo 1: Generación, 1985, editado por la Gerencia de Estudios de la Subdirección de Construcción, conocido comúnmente como COPAR.

La primera aproximación, se efectuó considerando cuatro escenarios de costo de inversión directa (Tabla 1), para ubicar su posicionamiento respecto a las tecnologías convencionales de generación.

Tabla 1

#### Escenarios de costo en dólares por kW instalado eólico

Bajo	800
Medio bajo	1000
Medio alto	1200
Alto	1400

Con esta información de entrada, factores de planta de 0.4 (valor medio para la región del sur del Istmo de Tehuantepec) y un año de período de construcción, se obtuvo el cuadro comparativo que se muestra en la Tabla 2.

En 1986, la caída en el precio internacional del petróleo hizo descender la fracción correspondiente al costo del combustible en termoeléctricas ( $2 \times 350$ ) de 59.28 a 34.21 mills/kWh. Se estimó entonces que una estabilización del precio internacional de referencia del orden de los 18 dólares por barril, daría un costo aproximado por concepto de combustible de 45 mills/kWh, comparable al costo de generación con energía eólica con costos totales de inversión en el rango de los 1000 dólares por kW instalado.

Durante 1987 se realizó un estudio económico más detallado, considerando el proyecto de una Central Eoloelectrónica de 30 MW, en tres puntos posibles de localización en el sur del Istmo de Tehuantepec: La Venta, La

Ventosa y Salina Cruz, con factores de planta anuales de 0.5, 0.316 y 0.327, respectivamente, de acuerdo a los estudios anemométricos realizados los dos años anteriores y simulando con aerogeneradores comerciales de 100 kW que eran el estandar comercial a mitad de la década de los 80's y considerando fabricación y ensamble en México de los aerogeneradores.

**Tabla 2**

**Comparación del costo unitario de generación, en US Cy,  
tasa de 10 por ciento, 1985.**

Central	Capacidad	Inversión	Combustible	Operación y mantenimiento	Total
	MW	mills/kWh	mills/kWh	mills/kWh	mills/kWh
Térmica referencia	2 X 350	14.88	59.28	1.12	75.28
Eólica (800)	1 X 30	27.06	-	10.0	37.06
Eólica (1000)	1 X 30	33.82	-	10.0	43.82
Eólica (1200)	1 X 30	40.59	-	10.0	50.59
Eólica (1400)	1 X 30	47.35	-	10.0	57.35
Chicoasen	5 X300	43.21	-	0.40	43.61
Los Azufres	1 X 55	41.52	-	13.32	54.84

Este análisis nos llevó a las siguientes conclusiones: Las variables que más inciden en el costo unitario de generación son el costo de inversión por kW instalado y el factor de planta anualizado.

La primera es muy sensible al costo agregado por aranceles, fletes y seguros y la supervisión del montaje por personal proveniente del extranjero, por tanto, la generación eolieléctrica para ser económicamente viable requiere de fabricación y ensamble nacional, para abatir el costo del kW instalado.

Por lo que respecta al factor de planta, son las características eólicas del punto de explotación y el acoplamiento entre ellas y la respuesta aerodinámica del rotor los que lo determinan. Los resultados obtenidos en este análisis se muestran, con todo el detalle y amplitud pertinentes, en la Tabla 3.

En este análisis el costo directo de inversión se encontró de 950.00 dólares por kW instalado. Los resultados correspondientes a la composición de costos, porcentual y comparativamente, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3

**Estimaciones de costo unitario de Generación**  
dólares de 1986

Termoeléctrica Convencional	(2 X 350)	50.24 mills/kWh
Carboeléctrica Dual C. D.	(2 X 350)	55.92 mills/kWh
Diesel	(1 X 30)	62.81 mills/kWh
Geotérmica (Cerro Prieto)	(2 X 100)	56.22 mills/kWh
Hidroeléctrica (Chicoasen)	(5 X 300)	43.73 mills/kWh
Eoloeléctrica (FP = 0.5)	(1 X 30)	34.00 mills/kWh
Eoloeléctrica (FP = 0.316)	(1 X 30)	49.10 mills/kWh
Eoloeléctrica (FP = 0.40)	(3 X 30)	40.50 mills/kWh

Tabla 4

**Composición del costo de Inversión por Tecnología y tipo de Recurso**  
por ciento

Central	Obra civil	Montaje electromecánico
Termoeléctrica de Referencia	25.6	74.4
Carboeléctrica	28.6	71.4
Nucleoeléctrica	23.1	76.9
Geotermoeléctrica Los Azufres	34.4	65.6
Hidroeléctrica	77.0	23.0
Eoloeléctrica	13.0 Incluyendo torres	87.0

Esta Tabla muestra porqué es determinante el costo LAB del equipamiento en el sitio de construcción de la central.

**Comparación de costos y subsidios encubiertos.**

Dado que el análisis anterior se efectuó hace una década, se revisó la metodología y cifras en base a la 12ª edición del COPAR de 1992 (último publicado hasta finales de 1995) de la Subdirección de Programación de CFE. En la nueva metodología se consideran costos de combustible para los energéticos renovables. Para geotérmicas se considera como costo de

combustible, la exploración, perforación y operación de pozos en el campo geotérmico, durante la vida de la central, desagregando inversiones y operación del campo geotérmico de los de la central.

Para el caso de hidroeléctricas se toma como costo de combustible, los derechos por uso del agua turbinada. Tratándose de eoloelectricas y dado que no modifican el uso del suelo, la práctica más común es el arrendamiento del terreno. Esta renta constituye el costo del combustible y generalmente se establece como el valor del dos por ciento de la generación neta.

La edición del 92 incluye el análisis de costos incrementales cuando se consideran las tecnologías descontaminantes como desulfurizadores, quemadores de bajo  $\text{NO}_x$ , reductores catalíticos o no catalíticos y precipitadores electrostáticos, así, para un precio medio del petróleo de 15.72 dólares por barril en 1992, el costo unitario para las termoeléctricas de referencia fue de 56.55 mills/kWh y de 66.73 mills/kWh considerando equipo anti-contaminante, que sólo aplica al anhídrido sulfuroso, óxidos de nitrógeno y partículas sólidas. Se estima que una eoloelectrica en condiciones típicas, ( $1 \times 30$  MW), del orden de 1 000 dólares por kW instalado y factor de planta del 0.3, tendrá un costo unitario de generación de aproximadamente 55 mills/kWh.

Este costo en términos medios, aplicará de la siguiente manera: 43 mills a costos de inversión, 1.5 mills a costo de "combustible" y 11 mills a operación y mantenimiento. Esta estructura de costos se asemeja a la de carboeléctricas convencionales (sin equipo descontaminante) por cuanto inversión y operación, pero sin la componente del combustible.

Los datos mostrados nos indican el rango de valores del kWh eoloelectrico, que constituye un valor real, ya que en general, los precios de los combustibles están determinados por factores geopolíticos y estratégicos y hasta ahora no se consideran los costos externos de su utilización, como contaminación y sus consecuencias, cambio climático y sus consecuencias económicas directas y ambientales. Si la generación termoeléctrica se efectuara con cero emisiones, esto es, absorbiendo incluso las emisiones de  $\text{CO}_2$ , el costo de referencia se duplicaría. Para un país como los Estados Unidos, al precio de mercado del barril de petróleo que adquiere del Medio Oriente, habría que agregarle la parte proporcional por operar una flota naval que protege las rutas de transporte y la "estabilidad política" de la región.

Es artificial referir al precio internacional del barril de petróleo los costos de la energía, por los factores geopolíticos y estratégicos que lo deter-

minan, que no son necesariamente los de nuestro interés nacional, y que distorsionan nuestro esquema de costos, precios y tarifas, afectando el desarrollo sustentable, y por tanto ambientalmente "amigable" de nuestro sistema energético.

## **Recurso eoloenergético para la generación eléctrica interconectada al Sistema Eléctrico Nacional**

### **Regiones eoloenergéticas de México**

El conocimiento del recurso energético eólico en México está a nivel exploratorio y de reconocimiento, con algunas mediciones puntuales o de pequeñas redes anemométricas, que han servido para confirmar a nivel de prefactibilidad, la existencia de vientos técnicamente aprovechables y económicamente viables en las siguientes regiones:

#### **• Sur del Istmo de Tehuantepec**

Esta región contiene un área del orden de 2 000 km cuadrados expuesta a vientos muy intensos, dado un fenómeno monzónico entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec, donde aflora una corriente marina anormalmente caliente, originando un gradiente térmico y de presión que da lugar a un intenso viento del norte desde el otoño hasta la primavera. Esta región, considerando la infraestructura existente u otros usos del suelo podría asimilar una capacidad instalada del orden de los 2 000 a 3 000 MW, con un factor de planta medio de 0.45. En las zonas más propicias, con factores de planta del 0.6 anual y de 0.9 o más en el otoño.

#### **• Península de Baja California**

Esta península es interesante eoloenergéticamente, por varias razones, su extensión geográfica, su baja densidad poblacional y electricamente alimentada por sistemas aislados, cuando eólicamente es una barrera natural perpendicular a los vientos occidentales, que en sus montañas e innumerables pasos puede proporcionar muchos sitios con potencial explotable.

El poblado de la Rumorosa y zonas aledañas, así como el paso entre la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Martir, por donde pasa la carre-

tera y la línea eléctrica de Ensenada a San Felipe en el Golfo de California, son regiones identificadas con alto potencial eólico, que son indicativas de lo que puede encontrarse en muchos otros lugares de la península.

- ***Península de Yucatán***

La franca exposición de la península a los vientos alisios de primavera y verano, incrementados en su costa oriental por la brisa marina, y a los nortes en el invierno, hacen de Cabo Catoche, la costa de Quintana Roo y el oriente de Cozumel, zonas con potencial eólico interesante, para contribuir significativamente a los requerimientos de la península en apoyo de su generación termoeléctrica.

- ***Altiplano norte***

Desde la región central de Zacatecas a la frontera con los Estados Unidos, el norte del país se ve influenciado por la corriente de chorro de octubre a marzo, intensa y persistente, que como viento del poniente al impactar la Sierra Madre Occidental da lugar a innumerables sitios con potencial explotable.

- ***Región Central***

En la región central del altiplano, prevalecen los vientos alisios de verano, desde Tlaxcala a Guanajuato, que en Pachuca, la bella airosa, son más conocidos.

Estos vientos complementan estacionalmente, a los del altiplano norte y los del sur del Istmo de Tehuantepec. La complejidad orográfica de esta región, debe dar lugar a la existencia de innumerables pasos y mesetas donde el viento sea energéticamente aprovechable.

- ***Las costas del país***

El extenso litoral mexicano y sus islas, presenta por lo menos condiciones para generación eléctrica en pequeña escala y almacenamiento en baterías, sistemas híbridos diesel-eólicos y en otros generación interconectada. Dado el carácter localizado de este recurso, se requiere de una adecuada exploración y evaluación del mismo en el litoral.



### Patrones de oferta energética estacional

De la estacionalidad del viento observada en las diferentes regiones del país, derivada de la información del SMN, así como de mediciones con fines eoloenergéticas y de las simulaciones de generación eléctrica, con aerogeneradores modernos para estimar factores de planta mensuales, es posible determinar índices o factores mensuales de proporcionalidad al valor medio mensual de generación eoloeléctrica. La Tabla 5 muestra los índices encontrados para las regiones siguientes:

1. Centro Norte (Aguascalientes, Zacatecas, Durango y sur de Chihuahua y Coahuila);
2. Área Central (Tlaxcala, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Estado de México);
3. Sur del Istmo de Tehuantepec (Oaxaca);
4. Costa del Caribe (Quintana Roo); y,
5. Norte del Estado de Baja California Norte.

De estas regiones se cuenta con información confiable (Tabla 5), requiriéndose aún de trabajo exploratorio y mediciones en gran parte del territorio nacional.

**Tabla 5**

**Patrón Anual de oferta eoloeléctrica regional**  
Factores de proporcionalidad sobre el promedio mensual\*

Región	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ags	Sep	Oct	Nov	Dic
Centro Norte	1.13	1.2	1.2	1.16	1.03	0.9	0.8	0.8	0.8	0.86	0.96	1.06
Central	0.96	1.03	1.14	1.07	1.07	1.10	1.10	1.03	0.93	0.83	0.8	0.9
Istmo	1.42	1.33	1.11	1.11	0.46	0.44	0.71	0.8	0.84	1.13	1.22	1.22
Caribe	1.07	1.2	1.24	1.24	1.14	1.03	0.9	0.8	0.8	0.8	0.86	0.96
Norte Baja C.	1.22	1.32	1.35	1.45	1.26	1.16	0.87	0.48	0.39	0.8	0.9	0.74

\* Promedio mensual = Generación Bruta anual dividida entre 12.

Los índices mostrados, indican la estacionalidad esperada en la generación eoloeléctrica. la que deberá ser comparada con la demanda eléctrica

estacional, para efectuar los análisis de compatibilidad y determinar el nivel de penetración posible, por lo que respecta a los patrones horarios, la información disponible es restringida y se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6**

**Regiones geográficas y patrón diario de generación eoloelectrónica**

Período	Patrón diario	Istmo Tehuantepec	Costa de Quintana Roo	Norte de Baja California
Primavera	Pico	12-15 hrs.	19-21 hrs.	17-18 hrs.
	Valle	20-01 hrs.	03-04 hrs.	07-08 hrs.
Verano	Pico	11-14 hrs.	13-16 hrs.	17-18 hrs.
	Valle	23-01 hrs.	03-04 hrs.	08-09 hrs.
Otoño	Pico	03-22 hrs.	14-15 hrs.	13-14 hrs.
	Valle	00-01 hrs.	01-03 hrs.	20-21 hrs.
Invierno	Pico	13-14 hrs.	11-12 hrs.	12-14 hrs.
	Valle	19-21 hrs.	01-03 hrs.	19-20 hrs.

Se requiere un análisis más detallado de las velocidades medias horarias, en los sitios de explotación posibles en las Regiones Norte y Central, donde la complejidad orográfica da lugar a componentes locales de viento con un efecto muy marcado en los patrones diarios. De la información disponible se infiere una tendencia general a tener el pico de generación vespertino o en las primeras horas de la noche, en tanto la mínima se esperaría al amanecer.

**Factores de capacidad esperados**

Una estimación preliminar de los factores de capacidad (factores de planta mensuales, Tabla 7) considerando velocidades esperadas a 40 metros de altura en sitios con condiciones eólicas adecuadas a su explotación energética; homologando los sitios identificados, explorados y caracterizados en dichas regiones, y simulando generación con aerogeneradores de 500 kW, permite asumir que existen condiciones adecuadas para una explotación eoloenergética en gran escala en condiciones de viabilidad técnico económicas muy favorables.

Para la costa del Caribe en Quintana Roo y Cozumel e Isla Mujeres, y el norte de la península de Baja California, en la zona fronteriza con los Estados Unidos de América, los factores de planta esperados se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 7**

**Escenarios estimados de factores de planta mensuales para centrales eoloelectricas integradas al Sistema Nacional Interconectado**

Región	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ags	Sep	Oct	Nov	Dic
Centro Nte.	0.34	0.36	0.36	0.35	0.31	0.27	0.24	0.24	0.24	0.26	0.29	0.32
Central	0.28	0.30	0.33	0.31	0.31	0.32	0.32	0.30	0.27	0.24	0.23	0.26
Istmo	0.64	0.60	0.50	0.50	0.21	0.20	0.32	0.36	0.38	0.51	0.55	0.55
Promedio	0.385	0.39	0.38	0.367	0.285	0.277	0.30	0.30	0.29	0.312	0.325	0.347

**Tabla 8**

**Factores de planta mensuales estimados**

Región	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ags	Sep	Oct	Nov	Dic
Caribe	0.31	0.35	0.36	0.36	0.33	0.30	0.26	0.23	0.23	0.23	0.25	0.28
N. B. C.	0.38	0.41	0.42	0.45	0.39	0.36	0.27	0.15	0.12	0.25	0.28	0.23

De los factores mostrados en las tablas precedentes se derivan condiciones muy favorables de explotación eólica, ya que los promedios anuales de factor de planta (Tabla 9), son relativamente altos comparados con la media de Dinamarca o California (Estados Unidos de América) del orden de 0.25.

## **Desarrollo del Mercado Eléctrico en México**

### **Escenarios de desarrollo demográfico**

#### **• Pronósticos de población**

La Tabla 10 sintetiza la evolución histórica reciente y las proyecciones de población esperada al 2020 con sus parámetros complementarios de

edad media, densidad poblacional y la tasa de crecimiento observada y esperada.

**Tabla 9**

**Factores de Planta Anualizados**

<b>Región</b>	<b>Factor de planta estimado</b>
Centro Norte	0.30
Area Central	0.29
Istmo de Tehuantepec	0.45
Costa de Quintana Roo	0.29
Norte de Baja California N.	0.31

**Tabla 10**

**Evolución de la Población en México y proyecciones de crecimiento**  
*miles de habitantes*

<b>Año</b>	<b>1950</b>	<b>1960</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>
Total	27,740	36,879	50,455	67,056	84,511	93,674	102,410	117,651	130,645
Edad M.	19	17.5	16.8	17.6	20.0	21.7	23.3	26.9	30.7
Densidad	14	19	26	34	43	48	52	60	67
Tasa Inc.	2.7	3.13	3.14	2.6	2.25	2.23	2.07	1.75	1.45

Proyecciones de crecimiento medio.

Fuente: *World Population Prospects, The 1994 Review*, United Nations 1995.

**Evolución del índice de consumo de  
energía eléctrica per cápita**

Considerando los datos históricos y proyecciones de la población en México, así como los datos de capacidad instalada y generación bruta, históricos y proyectados, el índice de consumo eléctrico per cápita en México tendría una evolución esperada según se indica en la Tabla 11.

Este indicador económico, expresa el grado de desarrollo de la infraestructura de producción y servicios, así como del nivel de productividad de la economía de un país. Las crisis económicas recurrentes de los últimos veinte años, han frenado el desarrollo económico y por tanto el de este mis-

**Tabla 11**

**Desarrollo per cápita del Sector Eléctrico en México**

<b>Escenarios</b>	<b>1986</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Población (miles)	81 163	82 837	84 511	87 890	91 261	92 470	93 674	95 474	102 410	110 000	117 651
			<i>81 140</i>								
Capacidad instalada (MW)	21 286	24 445	25 299	27 068	29 204	31 649	33 037	35 371	39 572	46 743	59 698
Generación bruta (GWh)	89 506	110 724	115 000	122 902	128 046	137 522	142 344	150 075	164 700	198 400	251 500
kW/habitante	0.262	0.294	0.299	0.307	0.320	0.345	0.350	0.370	0.385	0.425	0.507
kWh/habitante	1 103	1 336	1 352	1 398	1 487	1 498	1 523	1 572	1 608	1 803	2 137

**Nota 1.** La generación bruta hasta 1995 corresponde a datos históricos de CFE, y de 1996 al 2000 corresponde a sus propias proyecciones de crecimiento.

**Nota 2.** Los datos de capacidad instalada hasta 1996 son de información reportada por CFE, y del 2000 al 2010 son estimaciones del autor, incluyendo la capacidad instalada por permisionarios.

**Nota 3.** Los datos del Censo de 1990 (indicados en cursivas) muestran una distorsión respecto a los datos generalmente aceptados en estudios demográficos respecto a México.

mo indicador. Se observa que el país se encuentra muy lejos de un consumo medio de 4 000 kWh/habitante-año que sería el indicativo básico de país desarrollado en el que existiera una capacidad instalada de generación eléctrica de un kW/habitante.

Las proyecciones actuales, dada la coyuntura del país y los tiempos políticos que se viven, permiten prever un posible despegue en el desarrollo, iniciado ya el próximo siglo, si se asume con claridad el papel rector de la economía del Estado, en un marco de economía mixta, y amplia participación de los diferentes sectores sociales. Mientras tanto, se observa que hasta el año 2010 se podría alcanzar una capacidad instalada de 0.507 kW/habitante y un consumo de 2 137 kWh/habitante-año, lo que nos ubica apenas a la mitad del camino. En la siguiente sección se describe como se llegó a las cifras indicadas.

## **Escenarios de desarrollo del Sector Eléctrico**

### **• Desarrollo histórico del consumo**

El documento "Desarrollo del Mercado Eléctrico 1989-2003", CFE, 1994, indicaba las expectativas de crecimiento que se tenían antes de la devaluación de diciembre. Las tasas históricas de crecimiento de las ventas de energía eléctrica y las proyecciones correspondientes al período 1993-2003 se indican en la Tabla 12.

**Tabla 12**

#### **Tasas medias de crecimiento anual de ventas**

<b>Período</b>	<b>Tasa media anual por ciento</b>
1963-1973	11.6
1973-1983	8.0
1983-1993	5.2
<b>1993-2003</b>	<b>Escenario económico</b>
Alto	5.4
Bajo	3.8

Las proyecciones de ventas y demanda bruta se realizaron en 1994 sobre la base de un crecimiento alto, considerando que las ventas crecerían de 103.3 TWh en 1993, a 133.0 TWh en 1998 y alcancen 175.6 TWh en el año 2003.

La revisión de 1995 colocó la tasa media de crecimiento en 4.9 por ciento para la siguiente década, según el escenario de "crecimiento esperado", aunque el escenario de "crecimiento moderado" lo ubica en una tasa de 3.5 por ciento anual. Según el escenario de crecimiento esperado, las ventas en el año 2000 ascenderían a 140.2 TWh y a 176.5 TWh en el año 2004, pronóstico que difiere en un año de atraso, al escenario de las proyecciones de 1994.

Dadas las circunstancias económicas actuales, las proyecciones de energía bruta parten de un crecimiento medio anual de 4.7 para el período 1995-2005, considerando un repunte económico a partir de 1988. Según este escenario, la energía bruta requerida para el 2004 sería de 218.7 TWh y considerando un factor de capacidad media del sistema de 0.492 se requeriría de una capacidad instalada de 50.76 GW. Si consideramos la tasa de "crecimiento moderado", la capacidad requerida sería de 44 GW y la energía bruta de 190.4 TWh. Este escenario es el que concuerda con el programa de expansión eléctrica prevista, según se indica en la Tabla 13.

**Tabla 13**

**Programa de expansión eléctrica, 1995 - 2004**  
*MW*

<b>Tipo</b>	<b>1994</b>	<b>Comprometido</b>	<b>Adicional</b>	<b>2004</b>
Vapor	13 274	1 020	-	14 294
Ciclo combinado	1 898	519	6 965	9 382
Turbogas	1 777	-	150	1 927
Combustión interna	140	-	75	215
Dual	2 100	-	-	2 100
Carbón	1 900	700	-	2 600
Nuclear	675	675	-	1 350
Hidroeléctrica	9,121	1 044	1 641	11806
Geotermoeléctrica	753	50	200	1 003
Eololéctrica	2	-	-	2
<b>Total</b>	<b>31 649</b>	<b>4 008</b>	<b>9 031</b>	<b>44 679</b>



En este programa de expansión de Comisión Federal de Electricidad, se concentra la atención en Centrales de Ciclo Combinado utilizando gas natural. Estas previsiones tienen mucho en común con el viejo programa nuclear de los 20 000 MW y el posterior de centrales duales con carbón importado. Todos estos escenarios fueron frágiles por depender excesivamente de circunstancias externas y macroeconómicas internas que finalmente los hicieron inviables. Por otro lado estas proyecciones no contemplan la participación de fuentes renovables no convencionales ni la de los permisionarios para cogeneración y autoabastecimiento.

El crecimiento del número de unidades de ciclo combinado, de estas proyecciones tiene varias incertidumbres: los productores independientes que hagan las inversiones, el suministro del combustible, preferentemente gas natural, por su origen y conducción, así como por las divisas necesarias para su posible importación.

Si tomamos en cuenta que en 1993 la cogeneración en la industria sumaba 2 530 MW utilizando combustibles fósiles y la industria azucarera contaba con 205 MW cuyo combustible en un 80 por ciento era bagazo de caña, es de prever un incremento significativo de la cogeneración en la industria y servicios para autoabastecimiento. Ya que este desarrollo del Sector Eléctrico al margen del Sistema Eléctrico Nacional, es decir, de la infraestructura de generación, transmisión, transformación y distribución de Comisión Federal de Electricidad, no ha sido posible considerarlo en los planes de expansión del mismo, es previsible que de aquí en adelante, su desarrollo sea importante y adquiera nuevas modalidades, determinadas por tecnologías emergentes y esquemas de financiamiento nuevos, que permitirán al sector privado y social una cada vez mayor participación en la responsabilidad social de electrificar el país, complementando a Comisión Federal de Electricidad.

- ***Desarrollo de la capacidad instalada de generación eléctrica***

La Tabla 14 muestra el desarrollo histórico reciente del Sector Eléctrico, y un estimado de escenarios posibles para los años 2000, 2005 y 2010 considerando el surgimiento de los permisionarios para cogeneración y autoabastecimiento, incluyendo el posible aprovechamiento de fuentes renovables, de las cuales la energía eólica tendrá el desarrollo más importante durante la próxima década. Dichos escenarios se basan en el creci-

**Tabla 14**

**Evolución histórica del Sector Eléctrico**

**Desarrollo histórico reciente**

<b>Año</b>	<b>1985</b>	<b>1986</b>	<b>1987</b>	<b>1988</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>
Generación (GWh)	85 301	89 506	96 419	100 673	110 724	115 000	119 199	122 902	126 566	137 522	142 344
Incremento (por ciento)	7.32	4.86	7.72	4.41	3.45	3.86	3.65	3.11	4.19	8.66	3.5
Capacidad (MW)	20 807	21 286	23 145	23 953	24 445	25 299	26 799	27 068	29 204	31 649	33 037
Incremento (por ciento)	-	2.30	8.73	3.49	2.05	3.49	5.92	1.00	7.89	8.37	4.38
Factor de planta	0.46	0.48	0.47	0.48	0.52	0.52	0.50	0.52	0.49	0.49	0.49

Fuente: Estadísticas del Sector Eléctrico Nacional, CFE, 1993 y Desarrollo del Mercado Eléctrico, CFE, varias ediciones.

**Evolución de la capacidad instalada en el Sector Eléctrico Nacional y escenarios tentativos de crecimiento**

<b>Capacidad instalada</b>	<b>1986</b>	<b>1989</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1996</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
<b>Total</b>	<b>21 286</b>	<b>24 445</b>	<b>29 204</b>	<b>31 649</b>	<b>35 371</b>	<b>39 572</b>	<b>46 743</b>	<b>59 698</b>
<b>No renovables</b>	<b>14 199</b>	<b>15 984</b>	<b>20 293</b>	<b>21 773</b>	<b>24 490</b>	<b>28 487</b>	<b>31 040</b>	<b>36 148</b>
Fósiles	14 199	15 984	19 618	21 098	23 140	27 137	29 390	34 798
Vapor	9 949	11 300	13 974	13 274	14 548	14 548	14 548	14 548
Ciclo combinado	1 450	1 618	1 818	1 898	2 200	2 629	3 150	5 000
Turbogas	1 789	1 779	1 634	1 777	1 600	1 993	2 077	3 300
Combustión interna	111	87	292	149	140	177	215	250
Duales	-	-	-	2 100	2 100	2 100	2 100	2 100
Carbón nacional	900	1 200	1 900	1 900	2 600	2 600	2 600	2 600
Cogeneración	-	-	?	?	?	(3 000)	(4 700)	(7 000)
Nuclear	-	-	675	675	1 350	1 350	1 350	1 350
<b>Renovables</b>	<b>7 067</b>	<b>8 461</b>	<b>8 911</b>	<b>9 876</b>	<b>10 255</b>	<b>11 265</b>	<b>16 006</b>	<b>23 703</b>
Hidroeléctricas	6 532	7 761	8 171	9 121	9 500	9 792	12 200	15 450
Geotérmicas	535	700	740	753	753	1 003	1 003	1 100
Eolieléctricas	-	-	-	2	2	(300)	(2 000)	(5 000)
Solar	-	-	-	-	-	(30)	(300)	(1 000)
Biomásica	?	?	?	?	205	(250)	(500)	(1 000)

Fuente: Escenarios preliminares 8/nov/1996, ECM.

miento esperado del consumo eléctrico en las condiciones económicas presentes y partiendo de la configuración actual y la evolución de la capacidad instalada, considerando que por cuanto a carbón nacional, centrales duales y nuclear, ésta no puede incrementarse en un plazo previsible, y que por razones ambientales las centrales de vapor se desplazan por ciclos combinados en las nuevas inversiones, pero con un elemento de incertidumbre adicional por cuanto al suministro del gas natural.

Es este escenario de incertidumbres, sobre todo en lo referente al financiamiento de las inversiones adicionales, lo que le da mayor certeza a un crecimiento alto de las inversiones en pequeña escala para autoabastecimiento y cogeneración, que en el caso de energías renovables, encontrarán mayores incentivos para su desarrollo y facilidades de financiamiento, lo que hace prever su rápida expansión, sobre todo de la más madura y con mayores tasas de crecimiento a nivel mundial como lo es la energía eólica, de la que se prevé se completen al menos 14 000 MW instalados en el mundo a fin de siglo, por lo que se sabe del inventario de proyectos en proceso.

Es indudable que el Sector Eléctrico entra en una nueva fase de desarrollo, con amplias implicaciones de carácter institucional, por cuanto a la planificación de su crecimiento, la participación de los sectores privado, social y paraestatal a niveles municipales y estatales, así como de una complejidad creciente en la operación de los circuitos de distribución, convertidos de hecho en "buses" de intercambio de energía entre un creciente número de usuarios que serán también autoprodutores con excedentes horarios alimentados al sistema.

## **Conclusiones**

El desarrollo sustentable del Sector Energético, y del Eléctrico en particular, sólo puede efectuarse a través de una reestructuración total en que los paradigmas cambien. El desarrollo sustentable es un problema cultural, por tanto político y social, que implica una nueva visión tecnológica, una actitud social diferente, más vigilante y comprometida con una causa que es de todos: detener el deterioro ambiental y social que el actual modelo de desarrollo implica.

El aprovechamiento masivo de recursos energéticos renovables, bajo esquemas nuevos de participación social en su explotación y usufructo, es un pilar de un desarrollo sustentable, donde la energía eólica lleva la delantera por madurez tecnológica y económica, y por tanto constituirá una alter-

nativa importante de generación eléctrica y de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero asociada a la generación termoeléctrica.

La generación eoloelectrónica no sólo constituye una forma limpia de generación eléctrica, sino también la que provee más empleos locales y regionales. La generación eléctrica con energía eólica paga empleos, no combustibles. Esta forma de generación eléctrica no sólo es ambientalmente amigable sino que también lo es socialmente, al constituirse en un motor de desarrollo local y regional. Aprovechar la energía eólica no sólo mitiga emisiones de gases de efecto invernadero, también mitiga problemas sociales de desarrollo local y generación de empleos.

## Bibliografía

- Golding, E. W., *The Generation of Electricity by Wind Power*, E. & F. N. Spon Ltd, London, 1976.
- Hunt, V. D., *Wind Power*, Van Nostrand Reinhold Company, 1981
- Gipe, P., *Wind Energy comes of Age*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- Caldera, E., *Programa Operativo del Área de Energía Eólica, 1986-1988*, Documento Interno, IIE, 1985.
- E. Caldera, E., et. al., *Estimación Preliminar del Mercado de Aerogeneradores Integrados al Sistema Eléctrico Nacional*, Informe IIE/10/14/2067/109/F, IIE, 1987.
- Caldera, E., *Inventarios Nacionales de Recursos Energéticos No Convencionales*, 1ª Convención Nacional de Usuarios y Productores de Información Geográfica, INEGI, 1989.
- Caldera, E., *El Papel de las Fuentes No Convencionales de Energía en la Reestructuración de la Industria Eléctrica*, Informe IIE/10/14/2613/06/P, IIE, noviembre, 1989.
- Caldera, E. y R. Saldaña, *Análisis Preliminar del Viento en la Zona Costera del Estado de Quintana Roo*, Informe IIE/10/14/2787/102/F, IIE, junio 1990.
- Caldera, E., *Estado Actual y Perspectivas del Aprovechamiento de la Energía Eólica en México*, Informe IIE/10/14/2613/105/P, IIE, 1990.
- Caldera, E., *La Generación Eléctrica en México en el Siglo XXI*, Informe IIE/10/14/2613/10/P, noviembre, 1990.
- Caldera, E., *Parte III, Energía Eólica: Perspectivas de las Fuentes No Convencionales de Energía Dentro del Sector Eléctrico y su Posible Contribución a la Generación Eléctrica en Diferentes Regiones del País*, Informe IIE/10/14/2928/01/F, IIE, 1991.
- CFE, *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*, 6ª edición, 1986.
- CFE, *Idem*, 12ª edición, 1992.
- Caldera, E., et. al., *Evaluación del Potencial Eólico en el Cerro de La Virgen, Zac., Sitio Candidato para la Instalación de una Central Eoloelectrónica Piloto De 1 MW*, Informe IIE/10/14/3270/F, abril, 1992.
- Caldera, E., *La Generación de Electricidad con Energía Eólica en México*, Boletín IIE,

Vol. 18, Nº 4, julio/agosto, 1994.

- Caldera, E., *Evaluación de Aportación Energética: Central Eoloeléctrica de 30 MW*, Cozumel, Q. Roo, Informe para CFE, IIE, 1994.
- Comisión Federal de Electricidad, *Informe de Operación 1994*, 1995
- Comisión Federal de Electricidad, *Desarrollo del Mercado Eléctrico, 1989-2003*, 1994.
- Caldera, E., *Generación Eoloeléctrica Integrada al Sistema Nacional Interconectado*, IV Congreso Latinoamericano de Turbomaquinaria, Veracruz, Ver., noviembre, 1994. Publicado también en la Revista Solar, ANES, Nº 31, primavera, 1995.
- Caldera, E., *La Pequeña Producción Independiente de Energía Eléctrica*, Boletín IIE, Vol. 19, Nº 3, pp. 107-110, mayo-junio, 1995.
- Secretaría de Energía, *Documento de Prospectiva del Sector Eléctrico, 1995 - 2004*, Mexico, 1995.
- United Nations, *World Population Prospects, The 1994 Revision*, 1995
- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, *Potencial Nacional de Cogeneración*, 1995.
- *Wind Directions*, Newsletter of the European and British Wind Energy Associations, Vol. XV, Nº 2, January, 1996.
- Caldera, E., *Energía Eólica*, Capítulo de libro en preparación por la CONAE, Sobre Ahorro de Energía y Energías Renovables, 1996.
- Caldera, E., *Análisis Preliminar de Generación Eléctrica. Central Eoloeléctrica de 30 MW*, Proyecto Cruz Azul 2000 de Fuerza Eólica del Istmo, S. A. de C. V., La Ventosa, Oaxaca, estudio contratado por Fuerza Eólica del Istmo, S. A. de C. V., 1996.
- Caldera, E., *Evaluación de Aportación Energética, Central Eoloeléctrica de 30 MW*, Proyecto Baja California 2000, La Rumorosa, Baja California, estudio contratado por Baja California 2000, S. A. de C. V., 1996.

## **HACIA UN ESQUEMA DE GENERACION ELECTRICA DISTRIBUIDA CON ENERGIAS NO CONVENCIONALES**

Jorge M. Huacuz V.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas

Resulta difícil hoy en día imaginar al mundo sin electricidad. Desde que el despertador suena por las mañanas y encendemos la luz para levantarnos, nuestras vidas son una cadena incesante de eventos relacionados con el fluido eléctrico: la rasuradora, la secadora de pelo, las noticias por la radio, la cafetera con la aromática bebida, el horno de microondas calentando el desayuno, el portón de la cochera abriéndose automáticamente para que podamos sacar el auto, el elevador que nos conduce al piso donde se encuentra nuestra oficina, la computadora, el teléfono... Mientras trabajamos, en casa se deja escuchar la música del estéreo, el refrigerador con su constante ronroneo mantiene fríos los alimentos, la máquina de lavar limpia sin maltratar las prendas de vestir que luego son nuevamente secadas en la jaula giratoria de la secadora, para finalmente ser desarrugadas con una plancha que produce vapor y permite graduar la intensidad del calor requerido, según el material de la prenda de vestir; si llega a faltar el agua, la bomba automáticamente la sube al tinaco.

El metro y los trolebuses conducen a su destino a millones de pasajeros. El flujo de tráfico es regulado por los semáforos. Los obreros utilizan herramientas eléctricas. Las fábricas cuentan con motores, arcos para fundición, robots para el ensamblado de piezas. Los hospitales son un muestrario de los más ingeniosos equipos y aparatos electrónicos para cuidar la salud y la vida de los pacientes.

En la escuela, el profesor utiliza medios audiovisuales para educar a nuestros hijos. La malla de Internet se aprieta más a cada instante, haciendo al mundo más y más pequeño con su torrente de información. En el cielo, a varios kilómetros de altura, los saturados satélites reciben y transmiten millones de señales a cada instante, llevando entretenimiento, comunicación, oportunidades de negocios, ayudas a la navegación, información meteorológica, secretos militares, etcétera, etcétera, etcétera, en forma de sonido, imagen y códigos clasificados.

Por las noches, ya cansados de la diaria jornada, regresamos a casa y encendemos el televisor para enterarnos de los acontecimientos del mundo, o aprovechamos para llamar por teléfono a algún amigo o pariente que a cientos o miles de kilómetros de distancia escucha nuestras voces tan cerca como si lo tuviéramos frente a nosotros. Al final del día volvemos a la cama y apagamos la última luz en casa. Afuera, los faroles luminosos delinear las calles como enormes serpientes que inmóviles ven pasar la noche. En el buró, junto a nosotros, queda de guardia el reloj que con el influjo de la corriente eléctrica en su corazón de cuarzo, marca rítmicamente el paso del tiempo hasta que llega nuevamente la hora exacta de despertarnos al día siguiente.

No ha quedado aún perdida la memoria del tiempo en que la vida no era así. Nuestros abuelos, o sus padres, nacieron en la oscuridad, la monotonía, la dificultad y el aislamiento de un mundo sin electricidad. Hace poco más de cien años no existía el concepto de servicio eléctrico. Ni existían tampoco en parte alguna del mundo las grandes obras para producir, transportar y distribuir electricidad; ni los aparatos electrodomésticos, los equipos industriales, o los sistemas de telecomunicación para utilizar electricidad. Por supuesto, tampoco existían las empresas eléctricas. El mundo se iluminaba con teas encendidas, velas o lámparas de gas. Las industrias se movían con la fuerza mecánica del viento, del agua y, posteriormente, del vapor producido en calderas. Las comunicaciones se hacían a través de mensajeros, y las labores domésticas se ejecutaban a mano. Era un mundo diferente que la aparición de la electricidad cambió en forma radical.

Con la invención del generador eléctrico en 1831 y su posterior evolución, algunas instalaciones hidromecánicas en Inglaterra, Francia y Alemania, fueron convertidas en las primeras centrales hidroeléctricas de la historia. Con el advenimiento de las lámparas de arco eléctrico (1876), que posteriormente (1879) serían sustituidas por la lámparas de filamento incandescente, las ciudades y las mansiones empezaron a ser iluminadas eléctricamente. Son notables al respecto los proyectos de iluminación en la pequeña población de Godalming en Inglaterra en 1881 donde por primera vez una residencia fue iluminada con electricidad mediante un sistema comercial.

Los sistemas de aquel tiempo eran muy básicos e ineficientes. La potencia demandada por las lámparas para alumbrado público era tan grande que cada una de ellas requería tener su propio generador eléctrico. Con todo y sus limitaciones, los sistemas eléctricos comenzaron a ganar la prefe-



rencia de los usuarios por varias razones, incluyendo la seguridad (con frecuencia los sistemas de iluminación a gas provocaban incendios y explosiones), la facilidad y rapidez en el encendido, la ausencia de humos ofensivos al olfato y dañinos a la salud, y la mayor intensidad de la luz de las lámparas eléctricas. La economía no fue el factor motivante en los primeros proyectos.

Las primeras empresas eléctricas (Swan Electric Light Co. y Edison Electric Co.) se establecieron en 1881, con el propósito de comercializar los servicios de iluminación. A estas siguieron otras en varias partes del mundo, incluyendo Latinoamérica y Asia. Todas las empresas eléctricas de la época tenían características similares: eran pequeños consorcios que operaban sistemas de baja potencia (unas cuantas decenas de kilowatts) para alimentar pequeñas cargas industriales y de servicios municipales, a través de miniredes eléctricas locales. Típicamente, el sistema de generación era movido aprovechando pequeñas caídas y corrientes de agua en esquemas de lo que hoy denominamos pequeñas centrales hidroeléctricas, aunque también se desarrollaron pequeñas centrales termoeléctricas.

Varios factores contribuyeron a la aparición de los grandes sistemas eléctricos como los conocemos hoy en día. Por principio de cuentas, el crecimiento de la demanda eléctrica. Conforme avanzó el desarrollo industrial, más y más factorías en las áreas urbanas demandaban el servicio, dadas las ventajas inherentes de la electricidad sobre otras fuentes de energía. Esto fue acompañado de la aparición de equipos eléctricos y aparatos electrodomésticos, y por avances en la ingeniería de los sistemas, en los cuales se incorporaron nuevos materiales y nuevas técnicas que permitieron construir turbinas y generadores de mayor tamaño e incrementar la eficiencia de los sistemas. A la vez, los sistemas de mayor tamaño permitieron lograr economías de escala que redundaban en las ganancias de las empresas eléctricas, induciendo a que estas hicieran mayores inversiones y ampliaran su oferta, adelantándose a la demanda futura inmediata de electricidad. Al estallar la Primera Guerra Mundial, varios estados consideraron a los sistemas eléctricos como un asunto de seguridad nacional, con lo que a través de distintos mecanismos se fueron integrando las grandes empresas estatales, tanto en los países industrializados como en los países en desarrollo.

Las grandes empresas eléctricas han cumplido un papel importante en el desarrollo de la humanidad. Han sido pilar de la infraestructura industrial y vector en el proceso de desarrollo social y económico de las naciones, facilitando la introducción de servicios esenciales de salud, educación,



comunicación y entretenimiento, entre otros. A la vez, las grandes empresas eléctricas han sido actores principales en la construcción de miles y miles de kilómetros de líneas de transmisión y distribución del fluido eléctrico a lo largo y ancho de las naciones, como lo hacen con la sangre las arterias y las venas en el organismo humano. Ejércitos de empleados de las empresas eléctricas en todo el mundo, trabajan incesantemente produciendo electricidad noche y día, y asegurando que ésta llegue con la calidad y la oportunidad deseadas a todos los consumidores.

Con todo y ello, la tercera parte de la población mundial no tiene aún acceso al servicio eléctrico. Sus vidas todavía se desarrollan en la oscuridad, la monotonía, el aislamiento y la dificultad que imperaban en el mundo hace cien años; pero ahora agravadas por el deseo y la expectativa de contar con un servicio que saben existe, pero que no tienen al alcance. Distribuidos principalmente en las áreas rurales de los países en desarrollo, cerca de dos mil millones de personas ansían cambiar sus condiciones de vida, procurándose acceso a la electricidad y todo lo que con ella viene. Más no teniendo todavía al alcance la posibilidad de contar con el servicio, optan por tomar el camino que con mayor seguridad habrá de conducirlos a obtenerlo, y emigran a la ciudad. Allí, su capacidad económica es prácticamente nula, por lo que con frecuencia recurren al robo del fluido eléctrico con instalaciones improvisadas, poco eficientes, e inseguras, que ponen en riesgo sus vidas y sus pertenencias.

Los esfuerzos que realizan las compañías eléctricas para llevar el servicio hasta donde se requiere, resultan cada vez más costosos y menos efectivos. Conforme crece el tamaño de las líneas, el número de usuarios al final de ellas típicamente disminuye, su capacidad de consumo eléctrico y de pago por éste es más pequeña, la cobranza se hace más difícil, los requerimientos de mantenimiento de las líneas aumentan, crecen las pérdidas de electricidad a lo largo de los conductores, y baja la calidad del servicio al hacerse mayores la frecuencia de las interrupciones y las variaciones en el voltaje. Estos son algunos de los problemas que hacen pensar a los ejecutivos de las empresas eléctricas que ampliar las redes de distribución más allá de los grandes centros de carga no es buen negocio. Pero no son los únicos. Agobiadas por el peso de una enorme deuda económica, muchas empresas eléctricas de los países en desarrollo encuentran cada vez más difícil conseguir financiamiento para extender las líneas. El poco a su alcance prefieren utilizarlo para mantener la infraestructura con que cuentan y ampliar en lo posible su capacidad de generación de electricidad, ante

una demanda urbana e industrial que crece día con día. Así, en la actualidad son pocas las empresas eléctricas en el mundo que, apoyadas con fondos del erario público de sus países, continúan sus actividades de extensión de las redes eléctricas más allá de los centros industriales y de población importantes. La situación tiende a hacerse más grave con el presente esquema de privatizaciones de las empresas eléctricas, ya que la actividad de electrificación de sitios remotos tiende a disminuir aun más.

Las limitaciones de financiamiento no son el único, y tal vez tampoco el principal, problema que habrán de enfrentar las empresas eléctricas en los años por venir. La creciente conciencia en torno del problema ambiental global, ubica a las tecnologías de generación masiva de electricidad como uno de los principales elementos, actuales y potenciales, de producción de contaminantes, con los consecuentes impactos ambientales negativos: emisión de gases con efecto de invernadero, lluvia ácida y producción de desechos radiactivos, entre otros.

Aun cuando se han venido desarrollando tecnologías para contrarrestar los efectos negativos causados por las grandes plantas de generación eléctrica, la sociedad parece empezar a mostrar preferencias por opciones más benignas con el medio ambiente. Sin dejar de reconocer el valor de la electricidad como elemento para mejorar la calidad de vida y sostener el desarrollo económico, un número creciente de naciones han rechazado opciones de generación que, como la nuclear, si bien ofrecen la garantía de un suministro cuantioso de electricidad, también conllevan riesgos que esas naciones han preferido no tomar. Las grandes centrales de generación a base de carbón, combustóleo, e incluso las hidroeléctricas, también están siendo objeto de un cuestionamiento creciente de su balance entre los beneficios que produce la electricidad que generan y los costos reales que se derivan de su operación, incluyendo los ambientales.

Todo parece indicar que las grandes centrales de generación seguirán siendo en el futuro inmediato los principales puntos de suministro eléctrico para las zonas urbanas de mayor población y los centros de desarrollo industrial, aunque ciertamente a mayores costos que los actuales. Pero no está claro cómo los esquemas centralizados, tal como los conocemos hoy en día, puedan seguir marcando la pauta en el proceso de electrificación de la otra tercera parte de la población mundial que aún carece del servicio. Frente a esta situación se plantean dos caminos complementarios que marcan un nuevo rumbo en los esquemas de abastecimiento eléctrico. El primero, relativo al ahorro y uso eficiente de electricidad; el segundo, relativo

a la pequeña generación eléctrica con fuentes locales de energía.

La experiencia ha demostrado que es posible sostener el crecimiento económico de una nación utilizando menos electricidad por unidad de producto nacional que en el pasado. Esto, gracias a la existencia de tecnologías para utilizar más eficientemente la electricidad. También ha quedado bien establecido que es más barato ahorrar una unidad de electricidad, que generarla. Por ello, muchas naciones, principalmente en el mundo industrializado, cuentan con importantes programas de ahorro y uso eficiente de electricidad, con lo que han logrado diferir nuevas inversiones para generación, e incluso cancelar opciones tecnológicas de generación eléctrica con mayores riesgos para la sociedad y el medio ambiente.

Existe una variedad de recursos energéticos, disponibles en forma natural, que a nivel local pueden ser utilizados para generar electricidad: El sol, el viento, las pequeñas corrientes y caídas de agua, los desechos agrícolas y pecuarios, los desechos urbanos tanto sólidos como líquidos, entre otros. En la mayoría de los casos, la viabilidad técnica de estas alternativas para producir electricidad, tanto a pequeña escala (unos cuantos kilowatts) como a mediana escala (varias decenas de megawatts), ha sido ya establecida, mientras que su viabilidad económica se acerca cada vez más, conforme maduran las tecnologías para su aprovechamiento. Así, la capacidad instalada para generar electricidad utilizando la energía del viento y de desechos agrícolas y urbanos es ya importante en varios países y sigue creciendo, dadas las ventajas económicas y ambientales que ello representa.

La incorporación de los recursos energéticos locales en el esquema de generación eléctrica de un país o de una región, plantea cuestiones interesantes respecto a la evolución de la estructura del sistema eléctrico correspondiente. Con la disponibilidad actual de tecnologías, es posible conceptualizar una pequeña ciudad en la cual la basura se utilice como fuente de energía para producir electricidad. De igual forma, la energía contenida en las aguas negras sería recuperada con fines de generación. La electricidad así producida, complementada con generación eólica y solar en caso de que estos energéticos estén disponibles, y respaldada con algo de generación convencional, serviría para abastecer los servicios municipales de alumbrado público, suministro y tratamiento de aguas, alumbrado de edificios públicos, y otros servicios.

Este esquema de autoabastecimiento eléctrico puede extenderse al nivel doméstico y comercial, en el que unos cuantos paneles fotovoltaicos, tal vez combinados con pequeños generadores eólicos, pueden suministrar

toda la electricidad necesaria para la operación del inmueble. Lo mismo puede plantearse en el caso de granjas, agroindustrias, instalaciones turísticas y otras operaciones económicas que demanden cantidades modestas de electricidad. Combinados con la aplicación de equipos para el uso eficiente de electricidad, estos esquemas de generación distribuida pueden ser económicamente viables en el corto plazo.

El esquema de generación distribuida puede darse en dos modalidades: mediante sistemas aislados en sitios remotos, donde aún no hay acceso al servicio convencional; y con sistemas interconectados a la red eléctrica, donde ésta se encuentra ya disponible.

En el primer caso, la disponibilidad local de recursos energéticos debe ser tal que asegure el suministro eléctrico con la calidad y la oportunidad de los esquemas convencionales. En ocasiones esto sólo es posible con una capacidad considerable de almacenamiento de energía, lo que demanda mayores inversiones para construir los sistemas. Alternativamente, es posible integrarles un generador de respaldo operado con combustibles fósiles, con lo que disminuye la inversión inicialmente requerida pero aumentan los costos de operación. En esta gama de alternativas existen configuraciones óptimas que dependen de la disponibilidad local de recursos energéticos y del tamaño y características de la carga eléctrica.

Cuando la red está disponible, ésta constituye una buena opción de respaldo, por un número de razones técnicas y económicas, lo que da pie al concepto de generación dispersa con sistemas interconectados.

Los problemas técnicos de los sistemas de generación no convencional se han venido resolviendo, gracias a las importantes inversiones en investigación científica y desarrollo tecnológico que se han realizado en varios países en los últimos veinte años. El advenimiento de nuevos materiales, el florecimiento de los microprocesadores, y una concepción ingenieril más a tono con la realidad, han hecho que los equipos y los sistemas avancen a un punto de madurez tal que ahora ya es posible realizar proyectos exitosos, desde el punto de vista puramente técnico, con sistemas de generación con capacidades desde unos cuantos watts hasta varios miles de megawatts de potencia.

Los aspectos económicos también han mejorado significativamente. Algunas tecnologías, como los grandes aerogeneradores y los incineradores de biomasa, son ya competitivas en muchos casos con los generadores convencionales. Otras, como los generadores fotovoltaicos, se han reducido en precio cuando menos por un factor de cincuenta en los últimos veinte

años, y empiezan a consolidarse, como la opción preferida para el suministro de pequeñas cargas eléctricas en zonas remotas. En efecto, se estima que unas 300 mil familias en zonas rurales de países en desarrollo tienen como único suministro eléctrico pequeños generadores fotovoltaicos. En este nicho de mercado que crece día con día, la variedad de aplicaciones también se multiplica: sistemas de bombeo de agua, telecomunicaciones y otras aplicaciones productivas que demandan pequeñas cantidades de electricidad, están siendo ya abastecidas con energías no convencionales en una forma más económica de lo que sería con extensiones de red.

Con todo y ello, la generación distribuida no es todavía un esquema establecido. En realidad, aun se encuentran en los albores de su etapa inicial de introducción como concepto, y seguramente habrán de pasar varios años antes de que se resuelvan todos los problemas que inhiben su aplicación generalizada. Estos problemas se ubican básicamente en el ámbito de lo institucional, lo económico, lo financiero, lo social y lo ambiental. Los problemas técnicos que aún quedan pendientes, sin duda se resolverán en tanto se sostengan los niveles de gasto en investigación y desarrollo que se han observado hasta la fecha alrededor del mundo.

Por principio de cuentas, a fin de que el esquema distribuido logre establecerse, la estructura tradicional del sector eléctrico debe evolucionar hacia una en la cual puedan coexistir los sistemas de generación centralizados con los dispersos. Esto habrá de requerir nuevas formas jurídicas, reglamentarias, administrativas y operativas. Un cambio en esa dirección no será fácil tomando en cuenta el origen histórico y los más de cien años de tradición del esquema centralizado. Para algunos funcionarios de empresas eléctricas fuertemente centralizadas, principalmente de los grandes monopolios de estado, un paso hacia la generación distribuida podría ser equivalente a caminar hacia el pasado. Para otros también podría significar una disminución en el control y la eventual pérdida del instrumento político que significa el manejo de la empresa eléctrica. Los cambios institucionales aquí delineados no serán fáciles, pero son una condición indispensable para la transición.

Por un número de razones, algunas preconcebidas, otras todavía no bien entendidas, y tal vez otras más aún no descubiertas, el precio de la electricidad a los consumidores casi siempre es menor que sus costos reales. Sin duda la razón más frecuente, y al mismo tiempo la más evidente, gravita alrededor de los subsidios que se otorgan a las empresas públicas en una u otra etapa del proceso de abastecimiento eléctrico, y para los



cuales cada gobierno tiene sus propias justificaciones. Menos evidentes, pero sin duda en el mismo sentido, son los subsidios que se otorgan a los combustibles en general, incluyendo a los que se utilizan para generar electricidad. Más sutiles pero igualmente importantes son los costos indirectos en que tienen que incurrir las economías para asegurar un suministro energético oportuno y seguro; esto incluye el costo de protección contra desastres naturales, de la infraestructura para crear reservas estratégicas, o de actos de guerra para posesionarse de nuevas reservas energéticas fuera de sus territorios, o defender las propias en su caso. La mayoría de estos costos no se reflejan en el precio de los energéticos, incluyendo la electricidad, pero son costos reales que la sociedad debe pagar, típicamente en forma de mayores impuestos.

Aún no plenamente aceptados como parte del proceso económico, los costos ambientales de la actividad son sin duda una de las principales preocupaciones del hombre moderno. Pero aún no se logra un consenso en torno a cómo deben internalizarse tales costos en los procesos productivos, de tal forma que el precio de los productos, incluida la electricidad, refleje el costo del daño al ambiente que su producción implica. En términos ambientales, hay formas de generación de menor impacto que otras, pero este hecho difícilmente podrá traducirse en favor de las tecnologías más limpias en tanto no existan los mecanismos institucionales y económicos que lo reconozcan. Así, por más que las tecnologías no convencionales de generación disminuyen sus costos, éstas seguirán siendo relativamente más caras que las convencionales en el futuro inmediato, a menos que se contabilicen los costos ambientales involucrados.

Por décadas las empresas eléctricas de países en desarrollo han recurrido al endeudamiento externo para financiar las obras de expansión de su capacidad para el suministro del servicio. La disponibilidad de créditos relativamente blandos en los organismos financieros internacionales, hizo posible por un buen tiempo la construcción de grandes obras de generación, transmisión y distribución, muchas veces a costos superiores y en plazos más largos que sus contrapartes en los países industrializados. Pero la época del acceso fácil al crédito y de costos laxos parece haber llegado a su fin. Atrapadas entre el desinterés de una operación poco rentable y la dificultad de un mercado de capitales caros y escasos, un buen número de empresas eléctricas se debaten ante la disyuntiva de utilizar el poco capital a su alcance para acrecentar su capacidad de suministro, o bien destinar a dar mantenimiento a su ya, en muchos casos, obsoleta infra-

estructura. Lamentablemente para quienes no cuentan todavía con el servicio, típicamente las decisiones van en favor de lo segundo.

Una de las rutas actualmente más ponderadas para acceder financieramente fresco en los países en desarrollo, es abrir el sector eléctrico a la participación de capitales privados, nacionales o transnacionales. El grado de apertura varía de país a país. En algunos casos la privatización es total, quedando el estado responsable únicamente de los aspectos regulatorios. Algunos países optan por privatizar solo la parte de generación; otros solamente la distribución; y otros sólo la transmisión o alguna combinación de estas. Independientemente del esquema adoptado, se está haciendo evidente que la participación del capital privado es apenas un paliativo al problema de fondo de la electrificación. Si bien es cierto el capital privado refacciona financieramente a la empresa eléctrica, y en muchos casos releva al estado de su responsabilidad de operar y mantener una infraestructura muchas veces obsoleta e ineficiente, también es cierto que dicha participación se está dando por definición en aquellas áreas de la empresa que son económicamente rentables, o tienen un buen potencial para ello. Esto es entendible, ya que una de las principales motivaciones de la empresa privada es hacer negocio. Pero al mismo tiempo deja sin resolver el problema de la electrificación de las zonas remotas, en donde vive una tercera parte de la humanidad, el cual en principio no ha sido resuelto porque no hay suficiente capital para ello y, a su vez, no hay suficiente capital porque la electrificación de sitios remotos no se mira como un buen negocio.

La generación eléctrica dispersa con fuentes locales de energía, representa una opción para la electrificación de sitios remotos, que amerita ser analizada en su plena dimensión. En principio, resuelve un número de problemas inherentes al esquema de suministro centralizado: elimina las pérdidas eléctricas por transmisión y distribución; omite la necesidad de fuertes inversiones para la construcción de extensas redes de distribución; elimina los impactos ambientales asociados con la extensión de esas redes; y elimina los altos costos de mantenimiento de líneas aisladas en condiciones físicas adversas. Al mismo tiempo ofrece una vía para la participación de capital privado en la construcción de la infraestructura eléctrica de un país, a tono con las capacidades económicas locales y las necesidades reales de electricidad. Sin embargo, en este sentido el esquema de generación dispersa se orienta más hacia potenciar el capital local para resolver el problema de suministro eléctrico como instrumento de desarrollo social y económico local, que como un instrumento de negocios en sí mismo.

A la vez, el esquema disperso plantea un número importante de retos y oportunidades para la innovación, sobre todo en lo relativo al ámbito normativo técnico y administrativo, así como en el ámbito de las organizaciones locales. La sociedad en general está acostumbrada a un suministro eléctrico externo, con la única responsabilidad de su parte de pagar por el servicio. En el esquema de generación dispersa, la sociedad local adquiere nuevas responsabilidades, tanto por el lado del uso racional de la electricidad, como por el lado de la generación y suministro de la misma. En su concepción más básica, el establecimiento de cada sistema aislado de generación eléctrica implica al mismo tiempo la creación de una microempresa eléctrica, con responsabilidades administrativas, técnicas y financieras, a fin de hacer sustentable el esquema de generación dispersa. Los requerimientos para el abastecimiento de esta infraestructura no han sido todavía explorados en forma suficiente.

Desde el surgimiento de las grandes empresas eléctrica, los usuarios de la electricidad se fueron alejando poco a poco de la fuente de generación, tanto en el sentido real como en el figurado. Las pequeñas máquinas generadoras, que producían electricidad en las factorías o a nivel doméstico, fueron rápidamente sustituidas por conexiones con las redes de distribución eléctrica provenientes de centrales generadoras cada vez más grandes y cada vez más lejanas. La economía y otros requerimientos operativos del proceso de generación eléctrica, obligaron a las empresas a emplazar sus centrales de generación en sitios alejados de los centros de consumo, por ejemplo, sitios con mejor potencial de aprovechamiento hidroeléctrico, o aquellos con mejor disponibilidad de agua para el enfriamiento de las plantas termoeléctricas. Con ello, el consumidor de la electricidad fue perdiendo la noción del complejo proceso detrás del servicio que recibe, lo que muchas veces se traduce en hábitos dispendiosos en el uso de la electricidad. Para muchos, su conocimiento del proceso termina en el interruptor y en el tomacorriente de su casa; para otros más en el poste de la esquina; pocos imaginan más allá de la subestación eléctrica del barrio o la ciudad; y son menos aún los que piensan en las centrales eléctricas y su compleja y costosa operación.

En el esquema de generación distribuida, los puntos de generación y de consumo se acercan nuevamente, por lo que su viabilidad gravita alrededor de un número de iniciativas, decisiones y acciones que corresponde tomar al usuario de la electricidad. Entre otras, invertir para instalar su propio generador, operarlo y mantenerlo; administrar su sistema; y hacer uso



racional y eficiente de la electricidad que tiene disponible.

¿Qué puede motivar al usuario a adoptar el esquema de generación distribuida? Un buen número de razones: Su deseo de contribuir a proteger el medio ambiente y de ahorrar energéticos primarios no renovables. Su inclinación a explorar lo novedoso y a ganar estatus como individuo innovador. O simplemente su voluntad de ejercitar su libertad de elección. Por generaciones, los usuarios no han tenido otra opción que conectarse a la red; una opción por demás conveniente, económica y flexible. Sin embargo, la aparición de otras opciones de abastecimiento eléctrico, con sus propios atributos, abre al menos la posibilidad de que el usuario elija de acuerdo a sus propios intereses y preferencias.

El costo de su elección puede ser más elevado que el tradicional, pero el individuo no decide únicamente con base en los costos, sino además en relación con los beneficios, tangibles e intangibles, que pueden derivarse de su elección. Viajar en automóvil particular es típicamente más costoso que hacerlo en el transporte público colectivo; vivir en una residencia particular puede también resultar más caro que vivir en una unidad multifamiliar. Sin embargo, el individuo generalmente prefiere el automóvil particular, porque le ofrece rapidez, libertad, flexibilidad y otros beneficios; así mismo, prefiere la residencia particular porque le da confort, privacidad e independencia.

Los atributos de la generación distribuida no son aún plenamente reconocidos, ni cabalmente explorados. Todavía resta mucho por hacer para resolver problemas técnicos pendientes. Pero más aún para crear el marco de referencia institucional, reglamentario, organizacional y económico en que habrá de desarrollarse este esquema. De manera principal, aún queda el reto de probar la aceptabilidad social de esta opción.

## **FUENTES RENOVABLES DE ENERGIA EN MEXICO EN EL SIGLO XXI**

Jorge Gutiérrez Vera  
Facultad de Ingeniería, Universidad Anáhuac

### **Resumen**

En México, más del 75 por ciento de la energía eléctrica generada por el sector Eléctrico proviene de centrales eléctricas que usan combustibles fósiles, tales como Combustóleo, gas natural, diesel y carbón y por lo que se refiere a la industria del transporte, la gran mayoría de los vehículos automotores son propulsados con gasolinas y diesel y excepcionalmente se usa para este propósito gas LP. Lo anterior significa un uso indiscriminado de un recurso natural no renovable así como elevados grados de emisión de contaminantes a la atmósfera.

### **Introducción**

Antes de finalizar el próximo siglo, el mundo enfrentará una reducción de petróleo y gas natural como fuentes de energía. Esta reducción en la oferta energética dará como resultado que las fuentes alternas de energía jueguen un importante papel a nivel mundial, para el suministro de energía limpia, productiva y sustentable para satisfacer las crecientes necesidades de la población mundial. Los efectos de este fenómeno serán proporcionalmente, más adversos en los países en vías de desarrollo debido a mayores tasas de crecimiento poblacional.

En adición a lo anterior, existe una alta posibilidad que los aspectos ambientales a nivel mundial restrinjan el uso de los hidrocarburos antes de finalizar el siglo XXI. Es de esperarse que los precios de dichos energéticos para entonces, sean por lo menos de tres a cuatro veces su valor actual en términos reales.

Es de mencionarse que a nivel de inversionistas de compañías aseguradoras en todo el mundo, han demostrado un gran interés en financiar las fuentes alternas de energía, principalmente la fotovoltaica en virtud de

reconocer que el uso de combustibles fósiles están causando cambios climáticos negativos que afectan su negocio central. Una importante aseguradora atribuye el incremento en los costos de desastres naturales (180 billones de dólares americanos en 1995) debido a cambios climáticos y ha urgido a la industria aseguradora a jugar un papel más activo en la solución de estos problemas climáticos mediante la creación de una industria solar (fotovoltaica y termosolar) a nivel mundial.

El nuevo milenio está a la vuelta de la esquina y en el mundo ya existe una señal de alarma respecto de los niveles de contaminación existentes en algunas de las ciudades más pobladas de la tierra. Esta señal de alarma significa que si las compañías eléctricas en el mundo continúan usando combustibles fósiles para la producción eléctrica el mundo enfrentará severos problemas ambientales. En adición a lo anterior, muy pocas personas podrán pagar el precio de energéticos primarios y secundarios.

En virtud de lo anterior, surge una gran interrogante: ¿Cuándo será capaz el mundo de satisfacer la totalidad de sus necesidades energéticas de fuentes renovables de energía? en mi opinión personal, los esfuerzos desarrollados a nivel mundial en investigación y desarrollo en este campo están bastante atrasados para el logro de tal propósito. De lo anterior se puede desprender que algunos países podrán tener durante la primer mitad del siglo XXI, problemas para la satisfacción de sus necesidades energéticas. Lo anterior se convertirá en problemas de falta de fuentes de trabajo, pobreza y delincuencia, esto es, problemas económicos, políticos y sociales.

Las fuentes de energía renovable en México se muestran a continuación:

1. Fotovoltaica
2. Termosolar
3. Geotérmica
4. Bioenergía
5. Eólica
6. Micro-hidroelectricidad
7. Mareomotriz

### **Energía fotovoltaica**

Actualmente el Sector Eléctrico Nacional (CFE y LYF) proporciona

servicio de energía eléctrica al 95 por ciento de la población total del país, sin embargo, existen aproximadamente 90 000 pequeñas comunidades rurales de menos de 1 000 habitantes que aún carecen de este vital servicio.

La gran mayoría de estas comunidades no cuentan con caminos de acceso, están muy alejadas de los centros urbanos y en algunos casos, las viviendas de los campesinos están muy dispersas.

Esta es una de las principales razones por las que el Sector ha considerado las fuentes renovables de energía para la solución de estos problemas, toda vez que la electrificación rural por métodos convencionales, esto es, mediante la construcción de líneas y redes de distribución tomaría más de 50 años.

Es de mencionarse que la filosofía y estrategia de los programas de electrificación rural en México, están basados en los siguientes aspectos:

- a) Proporcionar a los campesinos una mejor calidad de vida. Con electricidad podrán tener acceso a otros beneficios tales como: educación, comunicación, entretenimiento, seguridad social, etcétera;
- b) Evitar la migración de campesinos a los grandes núcleos de población, ya que por no contar con educación no tendrán acceso al mercado de trabajo y se verán obligados a formar parte de la economía informal, a crear cinturones de miseria alrededor de las ciudades, a invadir predios particulares y a crear problemas socio-políticos a las autoridades;
- c) Con alumbrado los campesinos pueden trabajar o estudiar de noche, o bien tener reuniones entre ellos.
- d) Se puede fomentar con la electrificación de las comunidades rurales, el que los campesinos permanezcan en las comunidades para cultivar la tierra y obtener cosechas de granos y/o vegetales para consumo propio o bien para venta a otros; y,
- e) Con electricidad se pueden desarrollar pequeños talleres artesanales, lo cual reactivará la economía de la comunidad.

#### • **Sistemas fotovoltaicos aislados**

Actualmente la Comisión Federal de Electricidad tiene instalados aproximadamente 80 000 sistemas fotovoltaicos aislados en todo el territorio nacional, los cuales en términos generales cuentan con:

- a) Un módulo solar de 70 watts, 4.2 A, de silicio policristalino, orientados al sur con un ángulo de inclinación de 30 grados;
- b) Un controlador de corriente para regular el flujo de corriente del panel a la batería y prevenir sobre cargas;
- c) Una batería plomo ácido de descarga profunda de 200 A-H, 12 VCD; y,
- d) Caja de fusibles, herrajes y alambrado.

Con este esquema, los campesinos pueden tener en sus casas cuatro lámparas compacto fluorescentes de 13 watts y un contacto de 12 VCD.

Esta es la alternativa de menor costo para proporcionar a las casas de estas localidades rurales iluminación y algo de entretenimiento. Los sistemas fotovoltaicos aislados son muy fáciles de instalar, se pueden dejar funcionando en dos horas y vale la pena mencionar que es la única alternativa de solución cuando las casas están muy dispersas.

Un fabricante nacional está ofreciendo kits de 75 y 50 watts a precios de 4 500.00 y 3 300.00 pesos, respectivamente y exceptuando los paneles solares, el resto del equipo es de fabricación nacional.

Existen dos problemas con este tipo de sistemas:

1. Los campesinos deben ser entrenados para operar y mantener este tipo de sistemas y en muchos de los casos no hablan castellano, por lo que la incidencia de fallas en estos equipos es muy alta; y,
2. El suministro de energía es 12 VCD, lo cual dificulta conseguir aparatos electrodomésticos de estas características en las poblaciones rurales.

### • **Sistemas híbridos**

En la actualidad en México existen 10 sistemas híbridos operando con buenos resultados, los sistemas constan de módulos fotovoltaicos, generadores eólicos, controlador electrónicos, banco de baterías, inversores, rectificadores y un generador a diesel como respaldo.

La clave del éxito de estos sistemas es el hecho de entrenar a dos o tres campesinos para que lleven a cabo las rutinas más sencillas de mantenimiento tales como reposición de combustible y del electrolito de la batería, cambio de filtros y limpieza en general.

El hecho de asignarles esta responsabilidad a los campesinos desa-

rolla en ellos un sentido de pertenencia del equipo, lo cual deriva en el gran cuidado que tienen para llevar a cabo estas tareas, además, los campesinos son involucrados en el proyecto desde su concepción inicial y participan en el desarrollo de las obras civiles así como en el montaje y puesta en servicio del equipo. Es común que en este tipo de comunidades rurales uno de los campesinos sea propietario de una pequeña planta eléctrica de gasolina o de un tractor, por lo que tiene conocimientos generales de mecánica y de electricidad, lo cual facilita el entrenamiento para poder atender las tareas de mantenimiento ya mencionadas.

Además se le ayuda a constituir una sociedad cooperativa para aportar las cantidades requeridas para la operación y mantenimiento del sistema lo cual les proporciona una sensación de independencia, que aprecian en todo lo que vale.

El costo de estos sistemas es el más bajo desde el punto de ciclo de vida útil del equipo para las localidades que se encuentran a más de 15 km del último poste de la red de distribución de CFE, ofrecen energía a 120 VCA, con seguridad, flexibilidad, facilidad de crecimiento y buenas condiciones ambientales.

### **Sistemas termosolares**

La radiación solar puede ser convertida en calor y mediante el acoplamiento a un ciclo termodinámico, producir trabajo mecánico y/o electricidad. Para este propósito es necesario coleccionar y concentrar la radiación solar sobre diferentes superficies por los métodos más eficientes de que se disponga, para obtener una fuente de calor de temperatura elevada. La empresa Luz de Estados Unidos de Norteamérica, desarrolló un proyecto piloto en el desierto de Mojave consistente en una batería de espejos parabólicos que concentran y reflejan la radiación solar a un tubo localizado en el foco de la parábola por el cual circula un fluido que puede ser agua o aceite y mediante un equipo de transferencia de calor se produce vapor que se inyecta a una turbina para producir energía eléctrica. Mediante este sistema se obtiene una potencia de 700 MW.

Estos sistemas son consumidores intensivos de recursos de capital, por lo que en la actualidad, no se consideran viables desde el punto de vista económico, sin embargo, es de esperarse que con los incrementos esperados de los combustibles fósiles, principalmente los derivados del petróleo, los proyectos termosolares como el que nos ocupa se justifiquen eco-

nómicamente en el mediano plazo.

En México, los sistemas termo solares son ampliamente usados para calentar agua para propósitos domésticos, así como para calentar el agua de albercas. El diseño de estos sistemas se basa principalmente en las cartas de radiación solar promedio nacionales. En estas cartas se muestran los diferentes niveles de radiación solar por regiones geográficas del país, expresada en langley/día ( $1 \text{ langley/día} = 4.846 \times 10^{-4} \text{ kW/m}^2 = 0.01163 \text{ kWh/m}^2$  y por día).

Existen cartas de los niveles de radiación solar promedio por regiones geográficas del país, estas cartas también están disponibles sobre base mensual y dicho sea de paso, los criterios de diseño se basan en usar, para una región geográfica determinada el mes de menor radiación solar.

### **Energía geotérmica**

El crecimiento y desarrollo del mundo durará para siempre, así como también su necesidad de contar con fuentes energéticas sustentables. La energía geotérmica tiene el potencial de proporcionar una parte importante de esta energía en una forma limpia y eficiente. Esta energía proveniente del interior de la corteza terrestre se ha manifestado durante milenios en forma de volcanes, flujos de lava manantiales de agua hirviendo y geysers.

México, Estados Unidos, Italia y Nueva Zelandia son los países más avanzados del mundo en el campo de la energía geotérmica. En nuestro país, el 2.19 por ciento de la capacidad total instalada está representada por centrales geotérmicas, la generación total de estas centrales fue en 1996 del orden de 5 700 GWh.

Para finales del presente siglo, se pondrán en servicio 10 unidades adicionales de 20 MW cada una en Cerro Prieto III (4), en La Primavera, Jalisco (2), en Maritarrón, Mich. (2) y en El Chino, Mich. (2). Se espera que la contribución de energía geotérmica nacional en 1999 sea de 7 812 GWh, que representará el 4.87 por ciento de la generación bruta a nivel nacional.

### **Bioenergía**

La bioenergía significa el uso de materia orgánica como fuente de energía sustentable. Los combustibles más conocidos obtenidos de la biomasa son: bagazo de caña de azúcar, agave y vid, desperdicio de madera y carbón vegetal. Aproximadamente el 7.2 por ciento de la energía pri-



maria del país en 1996 provino de desperdicio de madera (leña) y se usó principalmente para cocinar en las áreas rurales. 1.6 por ciento de los kWh generados en el país en el mismo año se generaron partiendo del bagazo de caña y esta energía eléctrica se usó en los ingenios azucareros.

Los desechos sólidos municipales (basura) son potencialmente una fuente de energía renovable y conviene recordar que hacia finales de 1993 el nuevo Presidente de los Estados Unidos de Norteamérica Sr. William Clinton manifestó que con objeto de no discutir nuevamente el Tratado de Libre Comercio se hacía necesaria la firma de dos acuerdos paralelos a dicho tratado, uno en materia laboral y otro en materia ambiental. En este último se estableció la obligación para los municipios o empresas concesionarias de la disposición final de la basura de utilizar procedimientos para dicho propósito no contaminantes del medio ambiente, lo cual representó una prohibición, de hecho de los tiraderos de basura a cielo abierto obligando a municipios y concesionarios a la construcción de rellenos sanitarios para la disposición final de la basura.

Partiendo de lo antes mencionado, se puede afirmar que existen dos procedimientos para lograr una disposición final de la basura con métodos que no dañen el medio ambiente, esto es:

- a) *Waste to energy plants*. En este tipo de instalaciones, es posible incinerar los desechos sólidos municipales usándolos como combustible para producir vapor y mover una turbina de vapor con la cual es factible obtener energía eléctrica. Este tipo de sistemas es aplicado en los países desarrollados debido al alto poder calorífico de la basura, derivado del hecho de que la cantidad de materia orgánica de la basura es muy bajo debido al hecho de que en la mayoría de los hogares en países desarrollados, existen trituradores de desperdicios alimenticios, lo cual obviamente no sucede en los países en vía de desarrollo, en los que el contenido de materia orgánica de la basura es superior al 50 por ciento, por lo que el poder calorífico de la basura es muy bajo; y,
- b) *Rellenos sanitarios*. Debido al acuerdo paralelo al Tratado de Libre Comercio antes citado, prácticamente se hizo obligatoria la construcción de rellenos sanitarios para la disposición final de la basura y si consideramos que la basura en México en un 55 por ciento aproximadamente está constituida por desperdicios de alimentos y jardinería así como del hecho de que la falta de educación y de

ofertas de trabajo obliga a un porcentaje importante de la población al reciclamiento manual de la basura (pepenadores), los cuales reciclan: metales, vidrio, porcelana, madera, trapo, etcétera, al final de este reciclamiento manual de la basura el porcentaje de materia orgánica aumenta al 85 por ciento aproximadamente.

La materia orgánica en ausencia de oxígeno se descompone en dos fluidos uno líquido conocido como lixiviado y otro gaseoso conocido como biogás.

El lixiviado es el líquido percolado del agua de lluvia o de corrientes subterráneas filtrada a través de la capa de basura que se tiene que controlar cuidadosamente por ser agresivo al medio ambiente, principalmente a los mantos acuíferos. Se puede eliminar por evaporación al ponerlo en contacto con el aire en estanques de evaporación diseñados para tal propósito, o bien recuperarlo y reinyectarlo al relleno sanitario para acelerar la producción de biogás.

El fluido gaseoso, biogás, está compuesto fundamentalmente por un 55 por ciento de metano, un 35 por ciento de bióxido de carbono y el 10 por ciento restante es fundamentalmente hidrógeno, oxígeno, mercaptanos, ácido sulfídrico, etcétera, estos dos últimos compuestos son los que generan malos olores, por lo que también se deben manejar cuidadosamente. El metano obtenido de rellenos sanitarios ha sido analizado y se ha encontrado que tiene un poder calorífico del orden de 700 Btu/pie<sup>3</sup>. Por lo que puede ser usado para mover motores de combustión interna y producir energía eléctrica a costos marginales.

En la parte poniente de la Ciudad de México se construyó un relleno sanitario entre 1987 y 1994 en el que se depositaron siete millones de toneladas de basura pepenada que actualmente está generando casi 20 millones de metros cúbicos de biogás por año con los que se pueden producir 5 000 kW. Esta potencia puede ser entregada a Luz y Fuerza del Centro por parte del Departamento del Distrito Federal mediante un convenio de porteo de energía para hacerla llegar a las lámparas del alumbrado público con lo que el Departamento del Distrito Federal se podrá ahorrar 23 millones de pesos anuales en la factura del alumbrado público, lográndose una correcta disposición final de la basura y el aprovechamiento del biogás que evidentemente sustituirá en alguna medida derivados del petróleo para la producción eléctrica.

Es de mencionarse que la producción total de basura en el Area Me-

tropolitana de la Ciudad de México es del orden de 20 000 toneladas diarias con las que se pueden generar hasta 50 MW y en todo el territorio nacional, sería factible generar con este procedimiento hasta 200 MW.

## Energía eólica

La energía eólica ha sido usada para fines de navegación en el Río Nilo del antiguo Egipto desde hace más de 5 000 años. En México los tradicionales molinos de viento han sido usados desde hace muchos años para bombeo de agua y para moler granos. Este tipo de energía cinética aún sobrevive en el mundo actual.

El viento es una manifestación de energía inconsistente que varía, en lo que a velocidad se refiere con la hora del día, el mes del año, la altitud y la región geográfica. En virtud de ello no puede ser usada como fuente única de energía en localidades remotas. Por lo que se hace necesario que cuando esté presente la manifestación eólica aprovecharla para generar energía eléctrica y entregarla a la red de distribución o bien almacenarla en una batería. En México existen lugares con gran potencial eólico entre los que podemos citar: el área de La Ventosa en Oaxaca, los Estados de Hidalgo, Zacatecas, Guerrero, Michoacán y la Península de Baja California.

Los nuevos diseños de generadores eléctricos usan mecanismos de baja velocidad de acoplamiento directo, con lo que se evitan mecanismos de engranes complicados en las turbinas de viento reduciendo el peso y el costo del grupo turbina-generator. Además, los generadores modernos pueden ser de velocidad variable lo cual permite una respuesta flexible a diferentes velocidades de la flecha.

Desde el punto de vista ecológico, la energía del viento representa una fuente energética extremadamente limpia y sustentable, ya que tiene un bajo impacto ambiental manifestado generalmente por ruido y muertes de aves que chocan con las aspas del rotor, sin embargo, se están probando nuevos diseños más silenciosos y las aspas del rotor se están diseñando para que sean más visibles a los pájaros.

En México, como ya se ha mencionado, todos los sistemas híbridos están usando energía eólica y en 1994, CFE inició la construcción de la primer central eólica consistente en siete generadores de viento de 225 kW cada uno. Esta central se terminó en agosto del mismo año y en sus primeros seis meses de operación entregó a la red de distribución energía equivalente a 10 000 barriles de petróleo y evitó la emisión a la atmósfera

de 2 000 toneladas de CO<sub>2</sub>. Esta planta se localiza en La Venta en el Estado de Oaxaca y se estima que el potencial eólico de la región es del orden de 1 000 MW. Actualmente la Secretaría de Energía está desarrollando un proyecto nuevo de 56 MW en la región.

### **Micro-hidroelectricidad**

En muchas de las pequeñas comunidades rurales aisladas que aún carecen del servicio público de energía eléctrica, se dispone de una pequeña corriente de agua, este flujo de agua que en épocas de estiaje puede ser del orden de 0.5 m<sup>3</sup>/s y en épocas de lluvias puede alcanzar valores de hasta seis m<sup>3</sup>/s, por lo que con una pequeña caída o salto de tres a ocho metros, se pueden obtener potencias eléctricas de 15 hasta 500 kW.

La hidroelectricidad es una tecnología conocida desde hace más de 100 años con resultados muy buenos probados en todo el mundo. Actualmente existen diseños de pequeñas turbinas tipo bulbo, o de hélice que son aplicables a gastos y saltos pequeños que pueden ser usadas en comunidades rurales aisladas. La mayor parte de las componentes de estas mini centrales eléctricas se pueden fabricar y mantener localmente con lo que los costos se reducen considerablemente.

La hidroelectricidad es tal vez la fuente renovable de energía más limpia y segura, sin embargo se deben tomar precauciones para no afectar la vida animal y/o destruir manifestaciones de antiguas culturas.

En México las antiguas y pequeñas centrales hidroeléctricas que se cerraron por incosteables hace más de 25 años, se están repotenciando con diseños totalmente automatizados para aprovechar esta fuente renovable de energía. Es de mencionarse que simplemente en el Área Metropolitana del Valle de México existen caídas y gastos de importancia que pueden aportar del orden de 100 MW.

### **Energía mareomotriz**

Esta es la forma de energía más conocida de los océanos, es también renovable y sustentable, se ha usado por siglos, por ejemplo en Inglaterra se usó para moler granos desde 1170, también un sistema como este se usó en Londres para proporcionar agua a la población desde el siglo XVI hasta mediados del siglo XIX.

La energía de las mareas se obtiene mediante la construcción de pre-

sas que permiten la entrada de agua al vaso durante la marea alta y la regresan al mar durante la marea baja, el flujo de agua en ambas direcciones puede ser turbinado para la producción de energía eléctrica.

El uso de esta fuente energética declinó y eventualmente se suspendió totalmente principalmente por los grandes recursos de capital requeridos, sobre todo en las épocas de combustibles fósiles baratos y abundantes en estas épocas el mundo entero satisfizo sus necesidades energéticas del carbón y del petróleo, sin embargo con la crisis petrolera de 1970, las fuentes renovables de energía han recibido atención nuevamente.

En México con los 10 000 km de costa que tiene el país seguramente habrá sitios en los que se pueda aprovechar esta fuente de energía. Actualmente no se tienen estudios sobre este tipo de aprovechamiento, sin embargo si consideramos que en términos de energía eléctrica el kWh más caro es el que no se tiene, será necesario iniciar estudios sobre el particular así como sobre otros temas que persigan el mismo fin, tales como la gasificación del carbón, las celdas de combustible, etcétera.

## Conclusiones

El mundo no se puede dar el lujo de seguir usando en forma intensiva los combustibles fósiles para la satisfacción de sus necesidades energéticas tanto primarias como secundarias. Tenemos la necesidad imperiosa e impostergable de promover el desarrollo de fuentes energéticas sustentables y renovables. Es también necesario promover una ley de eficiencia energética que privilegie los esquemas de cogeneración, los sistemas de administración de la demanda de potencia y el consumo de energía eléctricas y por último se deben desarrollar esquemas de estímulos fiscales para las personas físicas y/o morales que usen fuentes renovables de energía o que pongan en práctica sistemas de ahorro, conservación y uso eficiente de energéticos primarios y secundarios. Si no hacemos esto, seguramente estregaremos a nuestros hijos un mundo peor del que recibimos de nuestros padres.

## Bibliografía

- *A Guide to the Photovoltaic Revolution*, Maycok & Stirewalt, Rodale Press, 1981, USA.
- *Consumer Guide to Solar Technology*, Sklar & Sheinkopf, Bonus Books, 1991, USA.
- *Energizing Rural Areas of Developing Countries Using IRIES*, R. Ramakumar, 31<sup>st</sup> Intersociety Energy Conversion Conference, Washington, D. C., 1996, USA.

- *Ingeniería de la Energía Solar*, Almanza, R. y A. Muñoz, El Colegio Nacional, 1994, México.
- *Options for Rural Electrification in Mexico*, Jorge Gutiérrez Vera, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, N° 3, September, 1992.
- *Power Plant Technology*, M. M. El Wakil, Mac Graw Hill, 1984, USA.
- *Use of Renewable Sources of Energy in Mexico, Case: San Antonio Agua Bendita*, Jorge Gutiérrez Vera, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, N° 3, September 1994.
- *Trends of Renewables in Mexico*, Jorge Gutiérrez Vera, 31<sup>st</sup> Intersociety Energy Conversion Conference, Washington, D. C., 1996.
- *Renewable Energy in Latin America & the Caribbean*, USAID-CREST- WI.

*Energía Eléctrica y Medio Ambiente en México*, editado por el Programa Universitario de Energía y el Instituto de Investigaciones Económicas. La edición consta de 1 000 ejemplares impresos en papel cultural de 60 kg para interiores y couché de 162 kg para los forros. Diseño de portada por Carlos Anaya Rodríguez y Raúl Hernández Muñoz. Se terminó de imprimir en Impresiones Arminda en octubre de 1997.



143

**1<sup>er</sup> SEMINARIO SOBRE SITUACION Y PERSPECTIVAS  
DEL SECTOR ELECTRICO EN MEXICO**

ISBN 968-36-6476-8



COORDINACION DE HUMANIDADES  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONOMICAS  
COORDINACION DE VINCULACION  
PROGRAMA UNIVERSITARIO DE ENERGIA  
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MEXICO

**TOMO  
3**